

УДК 532.546

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ГАЗОВОМ ПЛАСТЕ ПРИ ЕГО ЗАВОДНЕНИИ

Бурнашев Владимир Фитратович

д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Самаркандского государственного университета

e-mail: vladimir.burnash@mail.ru

Ибрагимова Дилшода Анвар кизи

Магистрант Самаркандского государственного университета

e-mail: ibragimova_dilshoda@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Рассматривается задача моделирования гидродинамических процессов многофазной фильтрации в газоконденсатном пласте при его заводнении. Динамика многофазного течения в газоконденсатном пласте при его заводнении, включающем в качестве составных элементов газоконденсатный пласт и водонапорный пласт рассматривается в рамках β – модели трехфазной фильтрации. В рамках вычислительного эксперимента проведены исследования процессов, происходящих в нефтяном пласте при закачке воды под водогазовый контакт (ВГК), в газовый пласт и их комбинации. Установлены как положительные, так и отрицательные стороны исследуемых технологий.

Ключевые слова: вода, вычислительный эксперимент, газовый пласт, модель, конденсат, математическое моделирование, насыщенность, фаза, фильтрация, численный метод.

ANNOTATSIYA

Gaz kondensati kollektorini suv bosishi davrida ko'p fazali filtirlashning gidrodinamik jarayonlarini modellashtirish muammosi ko'rib chiqilgan. Gaz kondensati rezervuaridagi ko'p fazali oqimning dinamikasi uning suv bosishi, uning tarkibiga gaz kondensati ombori va tarkibiy elementlar sifatida suv ombori kiradi, b-uch fazali filtirlash modeli doirasida. Hisoblash eksperimenti doirasida suv-gaz kontakti (WGC) ostidagi suvni gaz omboriga quyish paytida neft qatlamida sodir bo'ladigan jarayonlar va ularning birikmalarini o'rganish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazildi. O'rganilayotgan texnologiyalarning ijobiy va salbiy tomonlari aniqlandi.

Kalit so‘zlar: suv, hisoblash tajribasi, gaz kollektori, model, kondensat, matematik modellashtirish, to‘yinganlik, faza filtirlash, sonly usul.

ABSTRACT

The problem of modeling the hydrodynamic processes of multiphase filtration in a gas condensate reservoir during its flooding is considered. The dynamics of multiphase flow in a gas condensate reservoir during its flooding, which includes a gas condensate reservoir and a water reservoir as constituent elements, is considered within the framework of the β -three-phase filtration model. Within the framework of a computational experiment, studies of the processes occurring in the oil reservoir during the injection of water under the water-gas contact (WGC), into the gas reservoir and their combinations were carried out. Both positive and negative aspects of the studied technologies are established.

Keywords: water, computational experiment, gas reservoir, model, condensate, mathematical modeling, saturation, phase, filtration, numerical method.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов добычи газа, обеспечивающим достаточно высокую эффективность, является заводнение газовых месторождений. От правильного выбора системы заводнения, определения его наилучших технологических параметров зависит эффективность разработки этих месторождений. Выбор оптимальной системы заводнения может быть основан на результатах наблюдений промышленной эксплуатации, проведении натуральных экспериментов или проведении вычислительных экспериментов с использованием математического моделирования и средств вычислительной техники. Результаты наблюдений промышленной эксплуатации могут лишь констатировать изменения характеристик при применяемых системах заводнения. Проведение натуральных экспериментов связано с большими затратами финансовых и временных ресурсов. Кроме того применение неправильной системы заводнения может привести к снижению нефтеотдачи и к непредсказуемым последствиям. Поэтому самым экономичным и безопасным способом повышения добычи по нашему мнению является проведение серии вычислительных экспериментов на ЭВМ и выбора на их основе оптимальной системы заводнения.

Модель фильтрации газированной жидкости, предложенная в [1] предполагала, что, во-первых, фильтрация изотермическая и происходит при локально термодинамическом равновесии, во-вторых, многокомпонентная углеводородная смесь является псевдобинарной, при этом многокомпонентная

смесь заменялась двухфазной, состоящей из нефтяной и газовой фазы. Математическая постановка задачи в поршневом вытеснении одной жидкости другой принадлежит [2]. В указанных работах исследовалась модель поршневого (фронтального) вытеснения, причем предполагалось, что пористая среда и жидкость несжимаемы. Унифицированный ряд математических моделей, описывающих процесс вытеснения, дан в [3]. Наиболее полное исследование стационарной фильтрации газированной нефти дано в работе [4]. Изучению фильтрации смешивающихся жидкостей и газов в пористой среде посвящены работы [5]. В работе [6] дан обзор основных моделей теории многофазной фильтрации. Математическую модель движения газоконденсатной смеси сформулирована в [7]. В ней движение газоконденсатной смеси рассматривается по аналогии с движением газированной нефти, при этом в первом приближении предполагается, что газовая фаза подчиняется законам идеального газа и не меняет своей плотности с выпадением конденсата, относительная фазовая проницаемость для нее равна единице, выпадающий конденсат неподвижен, вязкость фаз не зависит от давления и т.д. Теория фильтрации газированной жидкости для описания особенностей установившейся фильтрации газоконденсатной смеси рассмотрена в работе [8]. В ней автор также принимает, что ретроградная конденсация приводит только к изменению эффективной проницаемости для газовой фазы, и пренебрегает изменением его состава. С использованием отмеченных выше результатов в [9] предложена модель фильтрации газоконденсатной смеси в трещиновато-пористой среде, в которой породу, насыщенную газоконденсатной смесью, представляют средой, состоящей из системы трещин и блоков, т.е. имеющей двойную пористость, и выписывает уравнение движения газоконденсатной смеси для трещин и блоков, а также соотношения, определяющие массообмен между ними. Разработка гидродинамической модели фильтрации газоконденсатной смеси, в которой рассматривается совместное течение взаиморастворимых жидкостей, с самого начала велась в двух направлениях. Первое направление охватывает разработку моделей течения двухфазной углеводородной жидкости с произвольным числом компонентов, второе связывает исследования в отмеченном направлении с идеей бинарной модели, т.е. движение газоконденсатной смеси (или любой многокомпонентной углеводородной системы) представляется как движение двухфазной и двухкомпонентной жидкости. В [10] выведена система уравнений движения для компонентов. При этом предполагалось, что движение подчиняется обобщенному закону Дарси, процесс изотермический, плотности жидкости и газовой фаз, а также вязкости фаз являются функциями давления и состава.

Приведенная ими система дифференциальных уравнений с соответствующими замыкающими соотношениями представляет собой замкнутую систему уравнений, определяющую течение многокомпонентной двухфазной жидкости в пористой среде при соблюдении локального термодинамического равновесия. В [11] продолжены начатые ранее исследования с учетом термодинамической неравновесности. Выведены дифференциальные уравнения движения двухфазной многокомпонентной углеводородной жидкости, учитывающие диффузионные потоки компонентов в фазах и перенос их через многофазную поверхность за счет разности химических потенциалов. К замыкающим соотношениям добавляются зависимости химических потенциалов от состава и давления. В работе [12] приведена замкнутая система уравнений, описывающих неизотермическую фильтрацию многокомпонентных жидкостей, и показано, что химические потенциалы, вязкости и плотности фаз зависят не только от состава фаз и давления, но и от температуры. Большое внимание уделено вопросам фильтрации многокомпонентной жидкости, где на основании численных расчетов равновесных процессов раз газирования (конденсации) установлена значительность движения состава смеси на изотермы раз газирования и предложен простой метод оценки необходимости использования фазовых соотношений при исследовании фильтрации реальных газожидкостных смесей. Кроме того, дано системное описание результатов исследований по стационарной фильтрации многокомпонентной углеводородной жидкости в условиях равновесного и неравновесного массообмена между фазами и оценено влияние предельной термодинамической неравновесности на показатели стационарной фильтрации. Комплекс вопросов по теории фильтрации многокомпонентных систем рассмотрен также в [12]. Авторы вывели уравнения изотермической фильтрации с фазовыми переходами и с учетом силы тяжести, а также уравнения, описывающие неизотермическую фильтрацию с учетом массообмена между фазами, пренебрегая диффузионным потоком в фазах. Вопросы, связанные с фильтрацией газоконденсатной смеси рассмотрены также в работах [13-15]. В [16] исследуются вопросы построения моделей течения газоконденсатной смеси и на примере двухкомпонентной смеси определяет влияние ее состава на фактор конденсатонасыщенности, показывает, что при выводе уравнений неразрывности можно учитывать неравновесность процесса через диффузию компонентов в фазах, описывает систему уравнений фильтрации газоконденсатной смеси с учетом фазовых соотношений, предполагая, что смесь углеводородов можно рассматривать как двух или трехкомпонентную, обсуждается выбор системы параметров, характеризующих процесс нестационарной фильтрации газоконденсатной смеси. Бинарная модель

изотермической фильтрации в пористой среде газоконденсатной смеси была предложена в [17], в которой масса углеводородов делится на четыре группы со своими плотностями: часть пластовой газовой фазы, которая после сепаратора становится коммерческим газом и остальная часть газовой фазы - часть пластовой жидкой фазы, которая по выходу из сепаратора становится коммерческим газом и остальная часть жидкой фазы. В качестве закона фильтрации для жидкой фазы используется обобщенный закон Дарси. Окончательное описание этой модели дано в работе [18]. В работе [19] дана модель фильтрации многокомпонентных смесей с фазовыми переходами, в которой вводятся независимые переменные, представляющие собой суммарные мольные доли компонент смеси, позволяющие освободиться от задания сложных многопараметрических зависимостей фазовых составов, их плотностей, молекулярных весов и вязкостей, и т.д., значения которых рассчитываются внутри самой задачи. Подобный подход использовался также в работах [2, 3].

Представление газоконденсатной смеси в виде однофазной многокомпонентной среды не совсем корректно, так как физические характеристики конденсата довольно существенно отличаются от характеристик газа. Применение же бинарной модели для описания фильтрации нефтегазоконденсатной смеси невозможно ввиду существенного влияния нефти и воды на процесс фильтрации. Поэтому для описания процессов фильтрации нефтегазоконденсатной смеси предпочтительно использовать модели многофазной многокомпонентной фильтрации, что и делается в данной работе.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для описания фильтрации газоконденсатной смеси используем следующий подход: газоконденсатную смесь представим как трехфазную систему, состоящую из водяной, конденсатной и газовой фаз. Причем воду и конденсат считаем нелетучими жидкостями, газ - растворимым в жидкостях, а конденсат может находиться как в жидком так и газообразном состоянии. При этом предполагается, что вода - смачивающая фаза, конденсат имеет промежуточную смачиваемость, а газ - не смачивающая фаза. Пластовые жидкости рассматриваются как раствор, состоящий из двух компонент: жидкости и газ при стандартных нормальных условиях. Предполагается так же, что флюиды в пласте находятся при постоянной температуре и в состоянии термодинамического равновесия. При таких условиях зависимость давление - объем - температура может быть представлена с помощью объемных коэффициентов:

$$B_1 = \frac{[V_1]_{ny}}{[V_1]_{cy}}, \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{[V_2 + V_{21}]_{ny}}{[V_2]_{cy}}, \quad (2)$$

$$B_3 = \frac{[V_3 + V_{31}]_{ny}}{[V_3]_{cy}}, \quad (3)$$

где $[V_\alpha]_{ny}$ - объем занятый фиксированной массой фазой α ($\alpha = 1, 2, 3$, индекс 1 соответствует газовой фазе, 2 - водяной фазе, 3 конденсатной фазе); $[V_\alpha]_{cy}$ - объем занятый фазой α при нормальных условиях; $[V_{21}]_{ny}$, $[V_{31}]_{ny}$ - объемы растворенного газа соответственно в воде и нефти в пластовых условиях.

Массообмен между жидкостями и газом учтем с помощью коэффициентов растворимости газа в жидкостях

$$R_2 = \frac{[V_{21}]_{ny}}{[V_2]_{cy}}, \quad R_3 = \frac{[V_{31}]_{ny}}{[V_3]_{cy}}, \quad (4)$$

и конденсатосодержания в газовой фазе

$$C = \frac{[V_{31}]_{ny}}{[V_1]_{cy}}. \quad (5)$$

Плотности фаз в пластовых условиях отнесенные к плотностям в нормальных условиях представим в виде

$$\rho_1 = \frac{1}{B_1} [(1 - C\bar{\gamma})\rho_{1cy} + C\rho_{4cy}], \quad (6)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{B_2} (\rho_{2cy} + R_2\rho_{1cy}), \quad (7)$$

$$\rho_3 = \frac{1}{B_3} (\rho_{3cy} + R_3\rho_{1cy}). \quad (8)$$

Тогда система дифференциальных уравнений описывающих фильтрацию газо-конденсатной смеси имеет вид [23]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{mS_1}{B_1} (1 - C\gamma) + \frac{mS_2 R_2}{B_2} + \frac{mS_3 R_3}{B_3} \right] + \\ & + \nabla \cdot \left[\frac{W_1}{B_1} (1 - C\gamma) + \frac{W_2 R_2}{B_2} + \frac{W_3 R_3}{B_3} \right] = Q_1, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{mS_2}{B_2} \right] + \nabla \cdot \left[\frac{W_2}{B_2} \right] = Q_2, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{mS_3}{B_3} + \frac{mS_1C}{B_1} \right] + \nabla \cdot \left[\frac{W_3}{B_3} + \frac{W_1C}{B_1} \right] = Q_3. \quad (11)$$

где: индексы 1, 2, 3 - соответствуют газу, воде и конденсату; S_α , B_α , Q_α , ($\alpha = \overline{1,3}$) - насыщенности, объемные коэффициенты и суммарный дебит скважин, m - пористость пласта, R_2 , R_3 - растворимость газа в воде и конденсате, C - содержание конденсата в газовой фазе $\bar{\gamma} = \frac{\gamma_4}{M_4} 22.41 \frac{293}{273}$ (отношение удельных весов конденсата в жидкой и газовой фазах), M_4 - молекулярная масса конденсата, t - время, W_α - вектор фазовых скоростей

$$W_\alpha = -\frac{Kf_\alpha}{\mu_\alpha} (\nabla p_\alpha - \gamma_\alpha \nabla Z), \quad (12)$$

K - абсолютная проницаемость пласта; f_α - относительные фазовые проницаемости; μ_α - вязкость; γ_α - удельный вес; p_α - вектор фазовых давлений.

Для замыкания этой системы кроме вытекающих из определений соотношения

$$\sum_{\alpha=1}^3 S_\alpha = 1, \quad (13)$$

и зависимостей

$$f_\alpha = F_\alpha(S_1, S_2, S_3) \quad (14)$$

требуется знание сложных многопараметрических зависимостей

$$\begin{aligned} B_\alpha &= F_\alpha(p, S_1, S_2, S_3), \\ \mu_\alpha &= F_\alpha(p, S_1, S_2, S_3), \\ R_\alpha &= F_\alpha(p, S_1, S_2, S_3). \end{aligned} \quad (15)$$

Система дифференциальных уравнений (1) - (12) с замыкающими соотношениями (13)-(15) и соответствующими начальными и граничными условиями представляет собой математическую модель трехмерной фильтрации.

При моделировании трехмерной фильтрации возникают большие сложности, как при выборе методов решения, так и реализации их на ЭВМ. Поэтому применяют различные методы сведения трехмерной задачи к двумерным.

В целом реализация двумерных моделей представляет также большие трудности, связанные, в частности, с нахождением функциональных зависимостей для параметров модели и вычислительными ресурсами. Поэтому на практике, используя аналогичные схемы упрощения, переходят от двумерных моделей к одномерным. Способы перехода различны и каждый из них применяется в конкретном случае и зависит от необходимой степени достоверности результата. В частности, можно использовать подход, используемый в [28,21]. В этих работах реальное плоское течение аппроксимируется квазиодномерным течением. Для этого всю область фильтрации условно разделяется на несколько зон, в пределах которых течение считается одномерным. В многорядных и регулярных системах ряды скважин заменяются параллельными галереями, между которыми течение одномерно. Для описания течения в окрестности скважин выделяются внутренние области, представляющие собой круги некоторого радиуса с центром в точках расположения скважин, внутри которых фильтрация плоскорадиальная. Тогда от системы уравнений (9)-(11) можно перейти к системе уравнений [25]:

$$A \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{mS_1}{B_1} (1 - C\gamma) + \frac{mS_2 R_2}{B_2} + \frac{mS_3 R_3}{B_3} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{u_1}{B_1} (1 - C\gamma) + \frac{u_2 R_2}{B_2} + \frac{u_3 R_3}{B_3} \right] = A \sum_k Q_{1k} \delta_k, \quad (16)$$

$$A \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{mS_2}{B_2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{u_2}{B_2} \right] = A \sum_k Q_{2k} \delta_k, \quad (17)$$

$$A \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{mS_3}{B_3} + \frac{mS_1 C}{B_1} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{u_3}{B_3} + \frac{u_1 C}{B_1} \right] = A \sum_k Q_{3k} \delta_k, \quad (18)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 S_{\alpha} = 1, \quad (19)$$

где

$$u_{\alpha} = -\frac{AKf_{\alpha}}{\mu_{\alpha}} \left(\frac{\partial p_{\alpha}}{\partial x} + \gamma_{\alpha} \frac{\partial D}{\partial x} \right), \quad (20)$$

$$\delta_k = \delta(x - x_k),$$

$A = b(z)H(z)$ - поперечное сечение элемента, $b(z)$ - ширина элемента, $H(z)$ - длина пласта, δ - дельта-функция Дирака, $Q_{\alpha k}$ - приведенные к стандартным условиям дебиты, k - номер ряда скважин.

Выражение для дебита скважин k - го ряда получим из рассмотрения квазистационарного трехфазного течения без учета гравитации во внутренней

области, ограниченной окружностями радиусов r_{ck} и r_{kk} с давлениями p_{ck} и p_{kk} на них:

$$q_{\alpha ck} = q_k \varphi_{\alpha k}, \quad \alpha = \overline{1,3},$$

$$q_k = \frac{2\pi \Delta z_k}{\ln \frac{r_{ck}}{r_{kk}}} \int_{p_{kk}}^{p_{ck}} K_k \left[\frac{(1+R_2)f_2}{\mu_2 B_2} + \frac{(1+R_3)f_3}{\mu_3 B_3} + \frac{C+(1-C\bar{\gamma})f_1}{\mu_1 B_1} \right] dp,$$

$$\varphi_2 = \frac{f_2}{\mu_2 B_2} \left[\frac{(1+R_2)f_2}{\mu_2 B_2} + \frac{(1+R_3)f_3}{\mu_3 B_3} + \frac{C+(1-C\bar{\gamma})f_1}{\mu_1 B_1} \right]^{-1},$$

$$\varphi_3 = \frac{f_3}{\mu_3 B_3} \left[\frac{(1+R_2)f_2}{\mu_2 B_2} + \frac{(1+R_3)f_3}{\mu_3 B_3} + \frac{C+(1-C\bar{\gamma})f_1}{\mu_1 B_1} \right]^{-1},$$

$$\varphi_1 = 1 - \varphi_2 - \varphi_3,$$

$$q_{\alpha ck} = n_k \varphi_{\alpha k}, \quad \alpha = \overline{1,3},$$

Здесь n_k - число скважин k -го ряда, f_k , Δz_k - проницаемости и мощность внутренней области k -го ряда. Значения f_k для нагнетательных скважин определяются условиями заданными на r_{ck} , а для добывающих - условиями на r_{kk} .

Для замыкания системы уравнений (16)-(18), кроме соотношений (19) необходимо задать начальные и граничные условия. В качестве начальных условий задаются распределения давления и осредненных по мощности насыщенных в начальный момент времени:

$$p(z,0) = \bar{p}(z), \quad S_\alpha(z,0) = \bar{S}_\alpha(z), \quad \alpha = \overline{1,3}. \quad (21)$$

В качестве граничных условий задаются условия на скважинах и внешних границах области течения. На эксплуатационных скважинах задается либо давление

$$p(z_k, t) = \bar{p}_k(t), \quad (22)$$

либо дебит

$$q_\alpha(z_k, t) = \bar{q}_{\alpha k}(t), \quad \alpha = \overline{1,3}. \quad (23)$$

На нагнетательных скважинах задаются либо давление и доли воды и газа в потоке:

$$p(z_k, t) = \bar{p}_k(t), \quad S_2(z_k, t) = \bar{S}_{2k}(t), \quad S_1(z_k, t) = \bar{S}_{1k}(t), \quad (24)$$

либо расходы воды и газа:

$$q_2(z_k, t) = \bar{q}_{2k}(t), \quad q_1(z_k, t) = \bar{q}_{1k}(t). \quad (25)$$

Если через границу жидкости втекают в область, то на границе задается либо давление и насыщенности воды, конденсата и газа:

$$p(0,t) = p^0(t), S_2(0,t) = S_2^0(t), S_3(0,t) = S_3^0(t), S_1(0,t) = S_1^0(t), \quad (26)$$

$$p(L,t) = p^L(t), S_2(L,t) = S_2^L(t), S_3(L,t) = S_3^L(t), S_1(L,t) = S_1^L(t), \quad (27)$$

либо расходы воды, конденсата и газа:

$$Q_2(0,t) = Q_2^0(t), Q_3(0,t) = Q_3^0(t), Q_1(0,t) = Q_1^0(t), \quad (28)$$

$$Q_2(L,t) = Q_2^L(t), Q_3(L,t) = Q_3^L(t), Q_1(L,t) = Q_1^L(t), \quad (29)$$

Если через границу жидкости вытекают из области, то на границе достаточно задать либо давление:

$$p(0,t) = p^*(t), p(L,t) = p^{**}(t), \quad (30)$$

либо расход

$$Q_\alpha(0,t) = Q_\alpha^*(t), Q_\alpha(L,t) = Q_\alpha^{**}(t), \alpha = \overline{1,3}. \quad (31)$$

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения нелинейной системы уравнений (16)-(31) используем, модифицированный метод «крупных частиц» [22].

Решение задачи (16)-(31) разобьем на три этапа: на первом в условиях "заторможенности" определяем давление и скорости, на втором - потоки масс, на третьем - окончательное распределение искомых величин.

Следуя логике протекающих процессов, исходную нестационарную систему уравнений (16)-(30) расщепляем по физическим процессам и в области

$$\Omega = \{(x,t): 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq \tau\}$$

вводим пространственно временную эйлерову сетку

$$\omega_{ni} = \{t_{n-1} = t_n - \Delta t, n = \overline{1, N_t}; x_{i-1} = x_i - \Delta x, i = \overline{1, N_x}\}, \quad (32)$$

Среду моделируем системой из жидких частиц, совпадающих в данный момент времени с ячейкой эйлеровой сетки. Расчет каждого временного шага разбиваем на три этапа:

1 этап - пренебрегаем эффектами, связанными с перемещением элементарной ячейки и определяем давление из следующего конечно-разностного уравнения:

$$A_i \frac{\Delta z}{\Delta t} \left\{ [G_1(1-C\gamma)]_i^{\sim} - [G_1(1-C\gamma)]_i^n - h_i^{\sim} [(G_1C)_i^{\sim} - (G_1C)_i^n] + G_{2i}^{\sim} [(h_{2i}^{\sim} - h_{2i}^n) + h_i^{\sim} (b_{2i}^{\sim} - b_{2i}^n)] + G_{3i}^{\sim} [(h_{3i}^{\sim} - h_{3i}^n) + h_i^{\sim} (b_{3i}^{\sim} - b_{3i}^n)] \right\} =$$

$$\begin{aligned}
&= \left[H_{li}^{\sim} C_{i+1/2}^{\sim} - (1 - C\bar{\gamma})_{i+1/2}^{\sim} \left(\frac{u_1}{B_1} \right)_{i+1/2}^{\sim} \right] - \left[H_{li}^{\sim} C_{i-1/2}^{\sim} - (1 - C\bar{\gamma})_{i-1/2}^{\sim} \left(\frac{u_1}{B_1} \right)_{i-1/2}^{\sim} \right] + \\
&+ \left[H_{2i}^{\sim} - R_{2i+1/2}^{\sim} \left(\frac{u_2}{B_2} \right)_{i+1/2}^{\sim} \right] - \left[H_{2i}^{\sim} - R_{2i-1/2}^{\sim} \left(\frac{u_2}{B_2} \right)_{i-1/2}^{\sim} \right] + \left[H_{3i}^{\sim} - R_{3i+1/2}^{\sim} \left(\frac{u_3}{B_3} \right)_{i+1/2}^{\sim} \right] - \\
&- \left[H_{3i}^{\sim} - R_{3i-1/2}^{\sim} \left(\frac{u_3}{B_3} \right)_{i-1/2}^{\sim} \right] + Q_i^{\sim} \Delta z, \tag{33}
\end{aligned}$$

где

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } z_i = z_k, \\ 0, & \text{если } z_i \neq z_k, \end{cases}$$

$$u_{\alpha i+1/2}^{\sim} = -Z_{\alpha i+1/2}^{\sim} \left(\frac{p_{i+1}^{\sim} - p_i^{\sim}}{\Delta z} + \gamma_{\alpha i+1/2}^{\sim} \frac{D_{i+1}^{\sim} - D_i^{\sim}}{\Delta z} \right), \tag{34}$$

$$Z_{\alpha i+1/2}^{\sim} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{AKf_{\alpha}}{\mu_{\alpha} B_{\alpha}} \right)_{i+1}^{\sim} + \left(\frac{AKf_{\alpha}}{\mu_{\alpha} B_{\alpha}} \right)_i^{\sim} \right],$$

$$\gamma_{\alpha i+1/2}^{\sim} = \frac{1}{2} (\gamma_{\alpha i+1}^{\sim} + \gamma_{\alpha i}^{\sim}), \quad \alpha = \overline{1,3},$$

$$R_{\alpha i+1/2}^{\sim} = \frac{1}{2} (R_{\alpha i+1}^{\sim} + R_{\alpha i}^{\sim}), \quad \alpha = \overline{2,3},$$

$$(1 - C\bar{\gamma})_{i+1/2}^{\sim} = 1 - C_{i+1/2}^{\sim} \bar{\gamma}_{i+1/2}^{\sim}, \quad C_{i+1/2}^{\sim} = \frac{1}{2} (C_{i+1}^{\sim} + C_i^{\sim}),$$

$$Q_{\alpha k}^{\sim} = q_k^{\sim} \varphi_{\alpha k}^{\sim} n_k, \quad \alpha = \overline{1,3}, \tag{35}$$

$$q_k^{\sim} = \frac{2\pi \Delta z_k}{\ln \frac{r_{ck}}{r_{kk}}} \left[\bar{f}_3 \int_{p_{kk}}^{p_{ck}} K_k(p) \frac{(1 + R_3(p))}{\mu_3(p) B_3(p)} dp + \bar{f}_2 \int_{p_{kk}}^{p_{ck}} K_k(p) \frac{(1 + R_2(p))}{\mu_2(p) B_2(p)} dp + \right. \\
\left. + \bar{f}_1 \int_{p_{kk}}^{p_{ck}} K_k(p) \frac{C + (1 - C\bar{\gamma})}{\mu_1(p) B_1(p)} dp \right]_i^{\sim},$$

Функции \bar{f}_{α} ($\alpha = \overline{1,3}$) - некоторые значения относительных проницаемостей, снесенные в ближайший узел сетки вверх по потоку.

Представим уравнение давления в виде

$$E_i^{\sim} p_{i-1}^{\sim} - I_i^{\sim} p_i^{\sim} + O_i^{\sim} p_{i+1}^{\sim} = -F_i^{\sim}, \tag{36}$$

где

$$\begin{aligned}
E_i^{\sim} &= \left[H_{1i}^{\sim} C_{i-1/2}^{\sim} - (1 - C\bar{\gamma})_{i-1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_1}{B_1} \right)_{i-1/2}^{\sim} + \left[H_{2i}^{\sim} - R_{2i-1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_2}{B_2} \right)_{i-1/2}^{\sim} + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left[H_{3i}^{\sim} - R_{3i-1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_3}{B_3} \right)_{i-1/2}^{\sim} \right] \right], \\
O_i^{\sim} &= \left[H_{1i}^{\sim} C_{i+1/2}^{\sim} - (1 - C\bar{\gamma})_{i+1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_1}{B_1} \right)_{i+1/2}^{\sim} + \left[H_{2i}^{\sim} - R_{2i+1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_2}{B_2} \right)_{i+1/2}^{\sim} + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left[H_{3i}^{\sim} - R_{3i+1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_3}{B_3} \right)_{i+1/2}^{\sim} \right] \right], \quad I_i^{\sim} = E_i^{\sim} + O_i^{\sim}, \\
F_i^{\sim} &= A_i \frac{\Delta z^2}{\Delta t} \left\{ [G_1(1 - C\gamma)]_i^{\sim} - [G_1(1 - C\gamma)]_i^n - h_i^{\sim} [(G_1 C)_i^{\sim} - (G_1 C)_i^n] + G_{2i}^{\sim} [(h_{2i}^{\sim} - h_{2i}^n) + \right. \\
&\quad \left. + h_i^{\sim} (b_{2i}^{\sim} - b_{2i}^n)] + G_{3i}^{\sim} [(h_{3i}^{\sim} - h_{3i}^n) + h_i^{\sim} (b_{3i}^{\sim} - b_{3i}^n)] \right\} - Q_i^{\sim} \Delta z^2 + \Phi_i^{\sim}, \\
\Phi_i^{\sim} &= \left\{ \left[H_{1i}^{\sim} C_{i-1/2}^{\sim} - (1 - C\bar{\gamma})_{i-1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_1}{B_1} \gamma_1 \right)_{i-1/2}^{\sim} + \left[H_{2i}^{\sim} - R_{2i-1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_2}{B_2} \gamma_2 \right)_{i-1/2}^{\sim} + \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left[H_{3i}^{\sim} - R_{3i-1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_3}{B_3} \gamma_3 \right)_{i-1/2}^{\sim} \right] \right\} (D_i - D_{i-1}) + \right. \\
&\quad \left. + \left\{ \left[H_{1i}^{\sim} C_{i+1/2}^{\sim} - (1 - C\bar{\gamma})_{i+1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_1}{B_1} \gamma_1 \right)_{i+1/2}^{\sim} + \left[H_{2i}^{\sim} - R_{2i+1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_2}{B_2} \gamma_2 \right)_{i+1/2}^{\sim} + \right. \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left[H_{3i}^{\sim} - R_{3i+1/2}^{\sim} \left(\frac{Z_3}{B_3} \gamma_3 \right)_{i+1/2}^{\sim} \right] \right\} (D_{i+1} - D_i).
\end{aligned}$$

Уравнение (36) решается методом прогонки в сочетании с итерационным методом Ньютона

$$\begin{aligned}
(H_i^n)^y &= H(p_i^{v-1}) + H'(p_i^{v-1})(p_i^v - p_i^{v-1}), \\
H &= \{(G_1(1 - C\bar{\gamma})), (G_1 C), h_2, b_2, h_3, b_3\}, \quad (37)
\end{aligned}$$

$$(Q_{\alpha i}^n)^y = Q_{\alpha}(p_i^{v-1}) + Q'_{\alpha}(p_i^{v-1})(p_i^v - p_i^{v-1}), \quad \alpha = \overline{1,3}. \quad (38)$$

Определив давление p_i^{\sim} , вычисляем скорости фаз по формуле (34).

2 - этап - определяются перетоки масс через границы элементарной ячейки

$$\left(\frac{u_\alpha}{B_\alpha}\right)_{i+1/2}^{\sim} = \begin{cases} \left(\frac{1}{B_\alpha}\right)_i^{\sim} u_{\alpha i+1/2}^{\sim}, & \text{если } u_{\alpha i+1/2}^{\sim} \geq 0 \\ \left(\frac{1}{B_\alpha}\right)_{i+1}^{\sim} u_{\alpha i+1/2}^{\sim}, & \text{если } u_{\alpha i+1/2}^{\sim} < 0 \end{cases}, \quad (39)$$

$$\alpha = \overline{1,3}.$$

3 - этап - определяются искомые параметры

$$A_i \Delta z \left\{ \left[\frac{m}{B_1} (1 - C\gamma) \right]_i^n S_{1i}^{n+1} - \left[\frac{m}{B_1} (1 - C\gamma) \right]_i^{n-1} S_{1i}^n + \left(\frac{mR_3}{B_3} \right)_i^n S_{3i}^{n+1} - \left(\frac{mR_3}{B_3} \right)_i^{n-1} S_{3i}^n + \right. \\ \left. + \left(\frac{mR_2}{B_2} \right)_i^n S_{2i}^{n+1} - \left(\frac{mR_2}{B_2} \right)_i^{n-1} S_{2i}^n \right\} + \\ + \Delta t \left\{ \left[(1 - C\bar{\gamma}) \frac{u_1}{B_1} \right]_{i+1/2}^n - \left[(1 - C\bar{\gamma}) \frac{u_1}{B_1} \right]_{i-1/2}^n + \left(R_3 \frac{u_3}{B_3} \right)_{i+1/2}^n - \left(R_3 \frac{u_3}{B_3} \right)_{i-1/2}^n + \right. \\ \left. + \left(R_2 \frac{u_2}{B_2} \right)_{i+1/2}^n - \left(R_2 \frac{u_2}{B_2} \right)_{i-1/2}^n \right\} = \Delta t A_i \sum_k Q_{1k} \delta_{1k}, \quad (40)$$

$$A_i \Delta z \left[\left(\frac{m}{B_2} \right)_i^n S_{2i}^{n+1} - \left(\frac{m}{B_2} \right)_i^{n-1} S_{2i}^n \right] + \Delta t \left[\left(\frac{u_2}{B_2} \right)_{i+1/2}^n - \left(\frac{u_2}{B_2} \right)_{i-1/2}^n \right] = \Delta t A_i \sum_k Q_{2k} \delta_{1k}, \quad (41)$$

$$A_i \Delta z \left[\left(\frac{m}{B_3} \right)_i^n S_{3i}^{n+1} - \left(\frac{m}{B_3} \right)_i^{n-1} S_{3i}^n + \left(\frac{mC}{B_1} \right)_i^n S_{1i}^{n+1} - \left(\frac{mC}{B_1} \right)_i^{n-1} S_{1i}^n \right] + \\ + \Delta t \left[\left(\frac{u_3}{B_3} \right)_{i+1/2}^n - \left(\frac{u_3}{B_3} \right)_{i-1/2}^n + \left(\frac{u_1}{B_1} \right)_{i+1/2}^n C_{i+1/2}^n - \left(\frac{u_1}{B_1} \right)_{i-1/2}^n C_{i-1/2}^n \right] = \Delta t A_i \sum_k Q_{3k} \delta_{1k}, \quad (42)$$

Определив искомые S_α^n переходим к следующему временному шагу и т.д..

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью обоснования расчетной модели проведен расчет гидродинамических показателей месторождения.

Пласт разбивается на зоны различающиеся между собой средней проницаемостью и мощностью. В свою очередь каждая и зон разбивается на расчетные элементы форма которых зависит от геометрии пласта и зон. Скважины группируются в ряды. Размеры расчетных элементов подбираются таким образом чтобы гидродинамическое взаимодействие между ними было по возможности минимальным. Ряды эксплуатационных скважин должны быть ортогональны продольной оси элемента. Расчетный элемент может иметь произвольную форму, боковые поверхности непроницаемы.

Представим схематично элемент газовой залежи в форме прямого параллелепипеда с одним добывающим и двумя рядами водонагнетательных скважин (рис. 1).

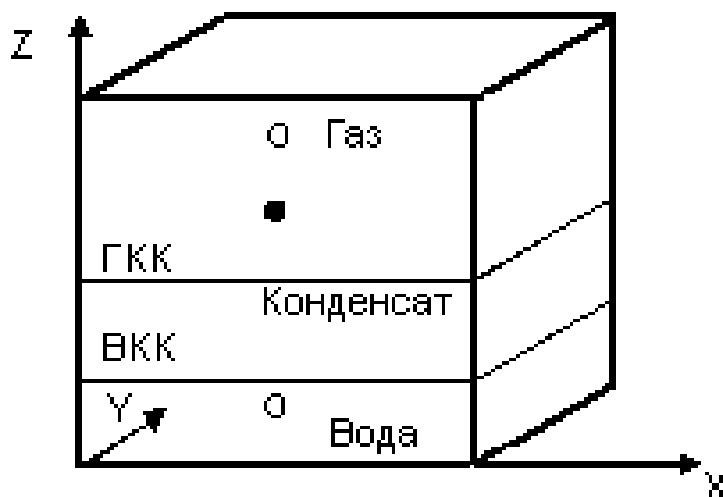


Рис. 1. Схематизация элемента залежи: ВKK – водоконденсатный контакт, ГKK – газоконденсатный контакт, о - нагнетательный ряд, ■ - добывающий ряд.

Исходные данные для гидродинамического расчета элемента следующие:

- эффективная мощность, $H = 800$ м;
- произведение $kH = 0.0073 * 800$;
- произведение $mH = 0.145 * 800$;
- физические свойства пластовых флюидов:
- вязкости

$$\mu_1 = 0.05 \text{ СП}; \mu_2 = 0.5 \text{ СП}; \mu_3 = 0.29 \cdot 10^{-3} * p \text{ СП};$$

- объемные коэффициенты

$$B_1 = 1[p; B_2 = 1; B_3 = 1.15 + 0.45 * 10^{-2} * p;$$

- коэффициенты растворимости газа

$$R_2 = 0; R_3 = 0.1 * p;$$

- зависимость содержания конденсата в газовой фазе от давления

$$C = (-0.637 + 0.0091 * p) * 10^{-4} ;$$

- зависимости удельных весов флюидов от давления

$$\gamma_1 = 1.29 * 10^{-6} [B_1; \gamma_2 = (0.001 + 1.29 * 10^{-6} * R_2) [B_2;$$

$$\gamma_3 = (0.625 * 10^{-3} + 1.29 * 10^{-6} * R_4) [B_4 ;$$

- молекулярная масса конденсата $M_4 = 171$ молей;

- относительные фазовые проницаемости флюидов:

$$k_1 = \left(\frac{S_1 - 0.1}{0.9} \right)^{3.5} [1 + 3(1 - S_1)], \quad 0.1 \leq S_1 \leq 1,$$

$$k_1 = 0 \quad 0 \leq S_1 \leq 0.1,$$

$$k_2 = \left(\frac{S_2 - 0.2}{0.8} \right)^{3.5}, \quad 0.2 \leq S_2 \leq 1,$$

$$k_2 = 0, \quad 0 \leq S_2 \leq 0.2,$$

$$k_3 = \left[\frac{0.85 - (S_1 + S_2)}{0.85} \right]^{2.8} [1 + (2.4 + 16.5 S_1) S_2], \quad 0 \leq S_1 + S_2 \leq 0.85,$$

$$k_3 = 0, \quad 0.85 \leq S_1 + S_2 \leq 1,$$

- начальное распределение осредненных по эффективной мощности насыщенностей газа, воды, и конденсатонасыщенности

$$S_2^0 = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq z \leq 20 \\ 0.2 & \text{при } 20 < z \leq 25 \\ 0.2 & \text{при } 25 < z \leq 80 \end{cases},$$

$$S_1^0 = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq z \leq 20 \\ 0.2 & \text{при } 20 < z \leq 25 \\ 0.12 & \text{при } 25 < z \leq 80 \end{cases},$$

$$S_3^0 = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq z \leq 20 \\ 0.2 & \text{при } 20 < z \leq 25 \\ 0.8 & \text{при } 25 < z \leq 80 \end{cases},$$

- расположение рядов (м): $z_1 = 15$, $z_2 = 45$, $z_3 = 70$.

Границы расчетного элемента непроницаемы, т.е. объемные расходы нефти, газа, конденсата и воды через границы равны нулю.

На основе исходных данных, указанных выше, проведена серия расчетов для элемента газоконденсатного пласта с одним добывающим рядом. Результаты расчетов гидродинамических представлены на рис. 2.

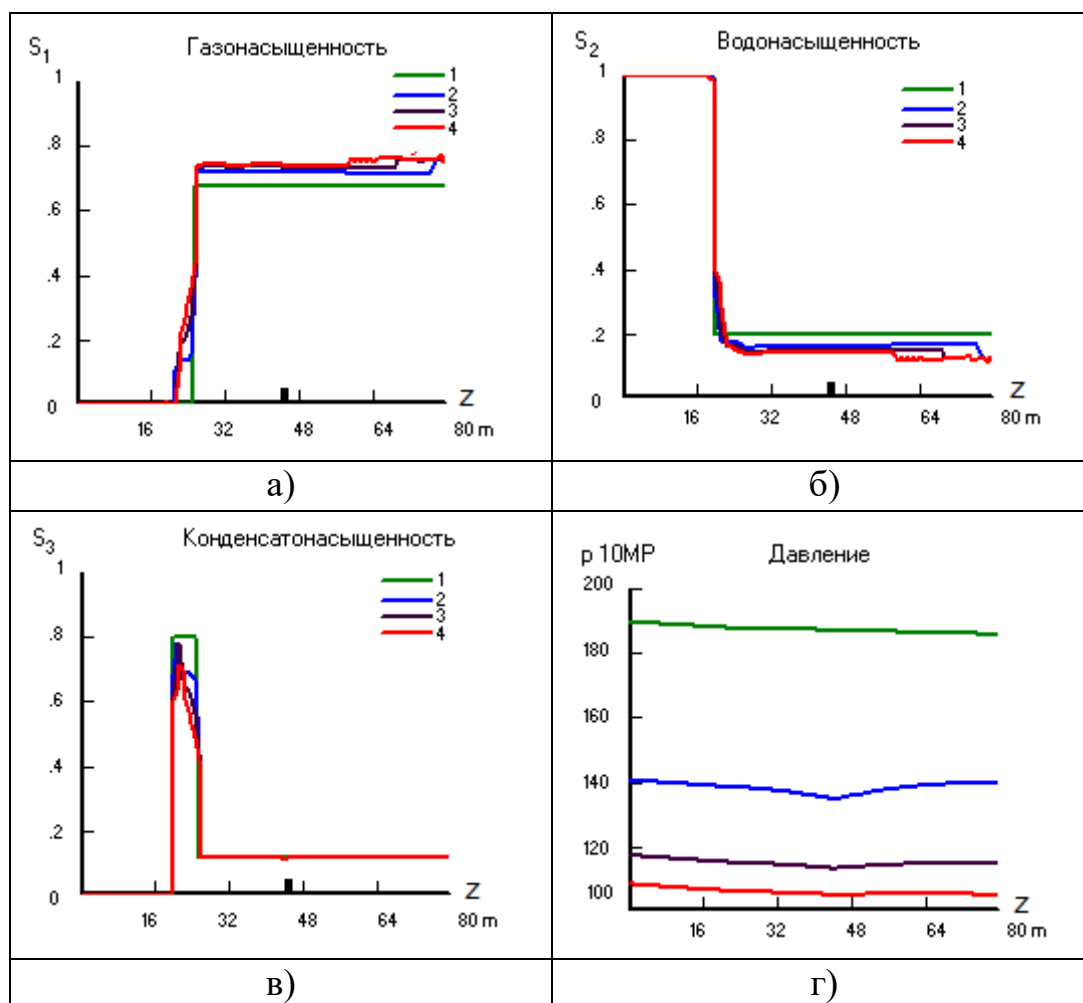


Рис. 2. Режим истощения: 1 – начальное распределение, 2 – через 9 лет эксплуатации, 3 - через 18 лет эксплуатации, 4 - через 27 лет эксплуатации; ■ - добывающий ряд.

Интенсивное извлечение газа происходит в течение всего периода эксплуатации (рис. 2а) за счет подпора воды (рис. 2б) и перехода части конденсата в газовое состояния (рис. 2в) за счет падения давления (рис. 2г). Появление небольшого количества газа в области ниже ГКК связано с разгазированием конденсата. Увеличение газонасыщенности в зоне конденсата связано с падением давления, и как следствие разгазированием конденсата, а также механизмом межфазного перехода.

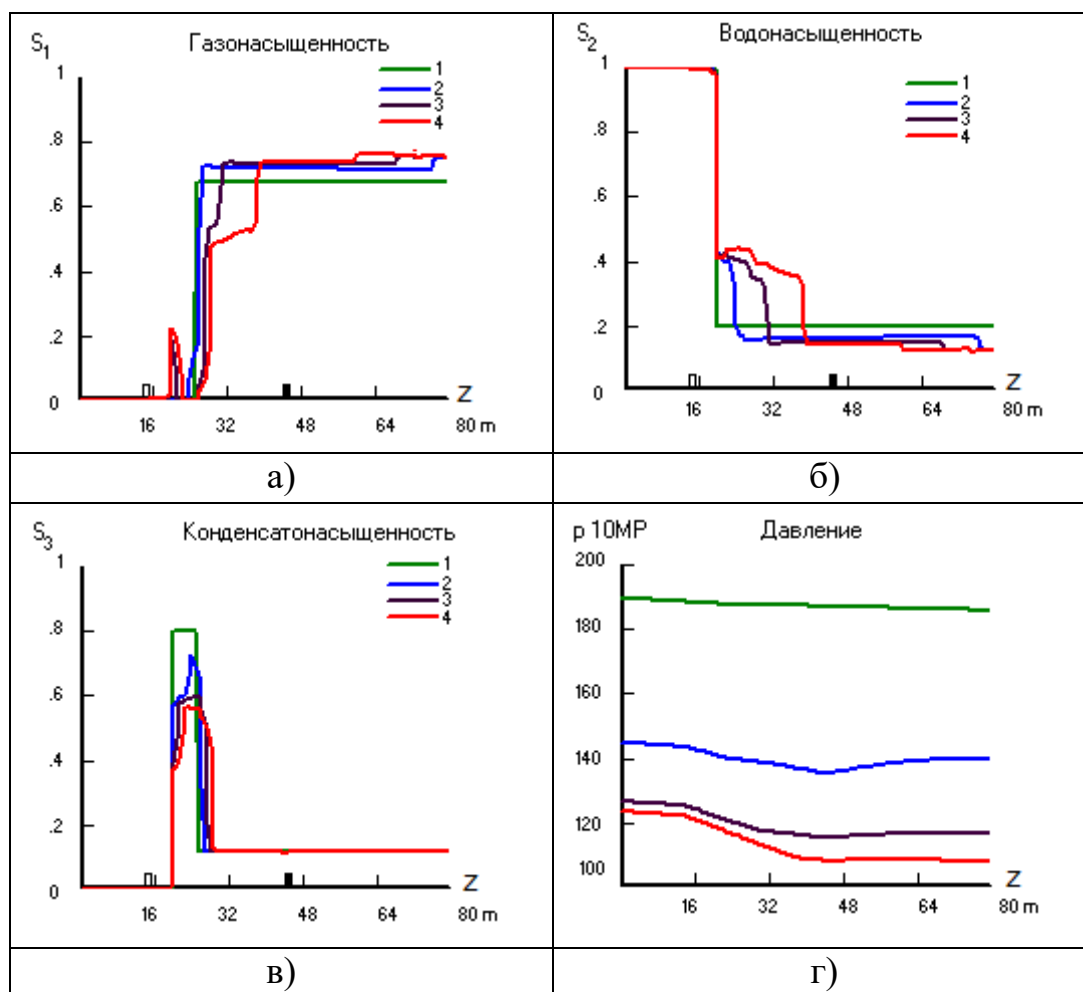


Рис. 3. Режим закачки воды под ВНК: 1 – начальное распределение, 2 – через 9 лет эксплуатации, 3 - через 18 лет эксплуатации, 4 - через 27 лет эксплуатации; □ - нагнетательный ряд ■ - добывающий ряд.

Интенсивное извлечение газа происходит в течение всего периода эксплуатации (рис. 3а) за счет подпора воды (рис. 2б) и перехода части конденсата в газовое состояние (рис. 2в) за счет падения давления (рис. 2г). Интенсивное извлечение в отличие от режима истощения происходит ниже добывающего ряда за счет нагнетаемой воды (рис. 3а). Некоторое расширение зоны конденсата связано с подпором воды (рис. 3в). Удастся поддерживать более высокое давление (рис. 2г).

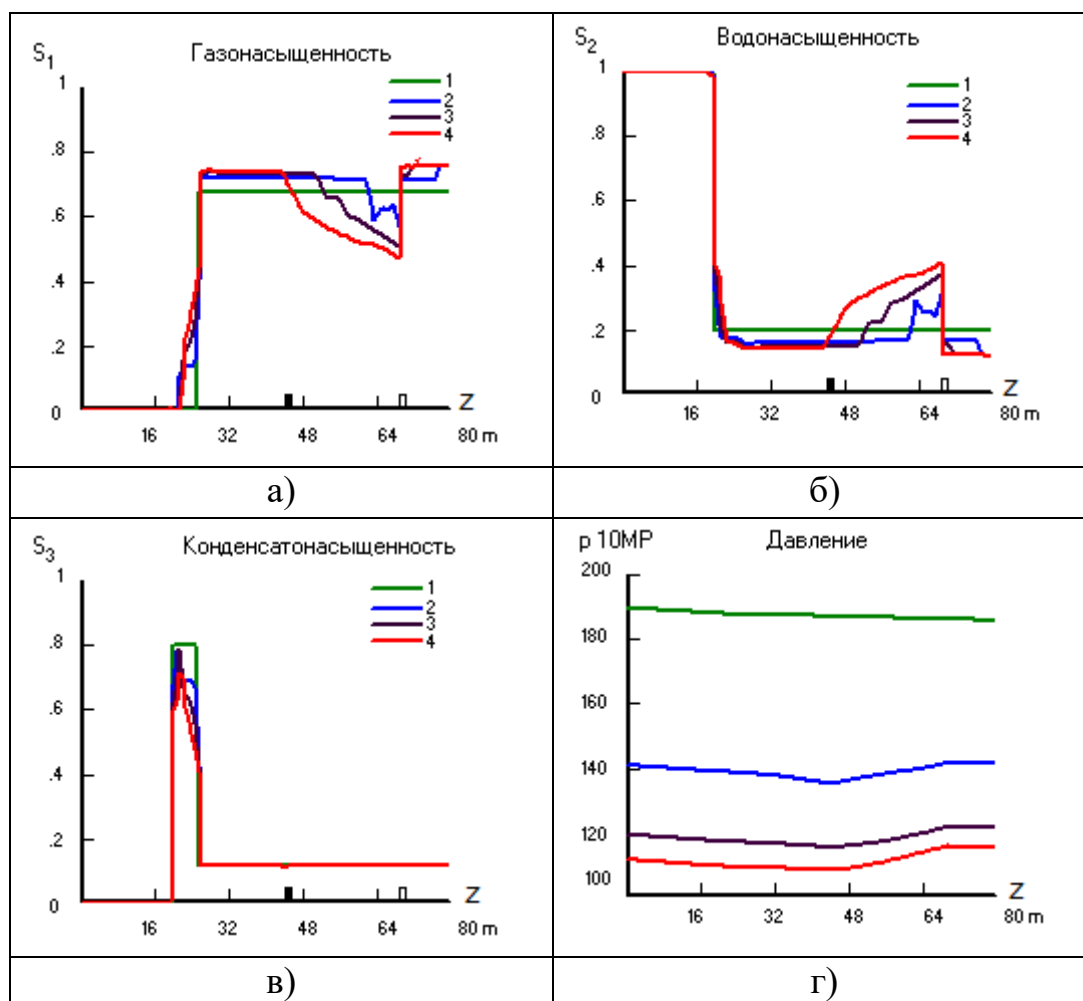


Рис. 4. Режим закачки воды в ГШ: 1 – начальное распределение, 2 – через 9 лет эксплуатации, 3 – через 18 лет эксплуатации, 4 – через 27 лет эксплуатации; □ - нагнетательный ряд ■ - добывающий ряд.

Интенсивное извлечение газа происходит выше добывающего ряда за счет нагнетаемой воды (рис. 4а). Наблюдается прорыв воды в добывающий ряд к концу эксплуатации (рис. 4б). Удастся поддерживать более высокое давление за счет нагнетаемой воды (рис. 4г). Однако оно ниже чем при режиме закачки воды род ГКК.

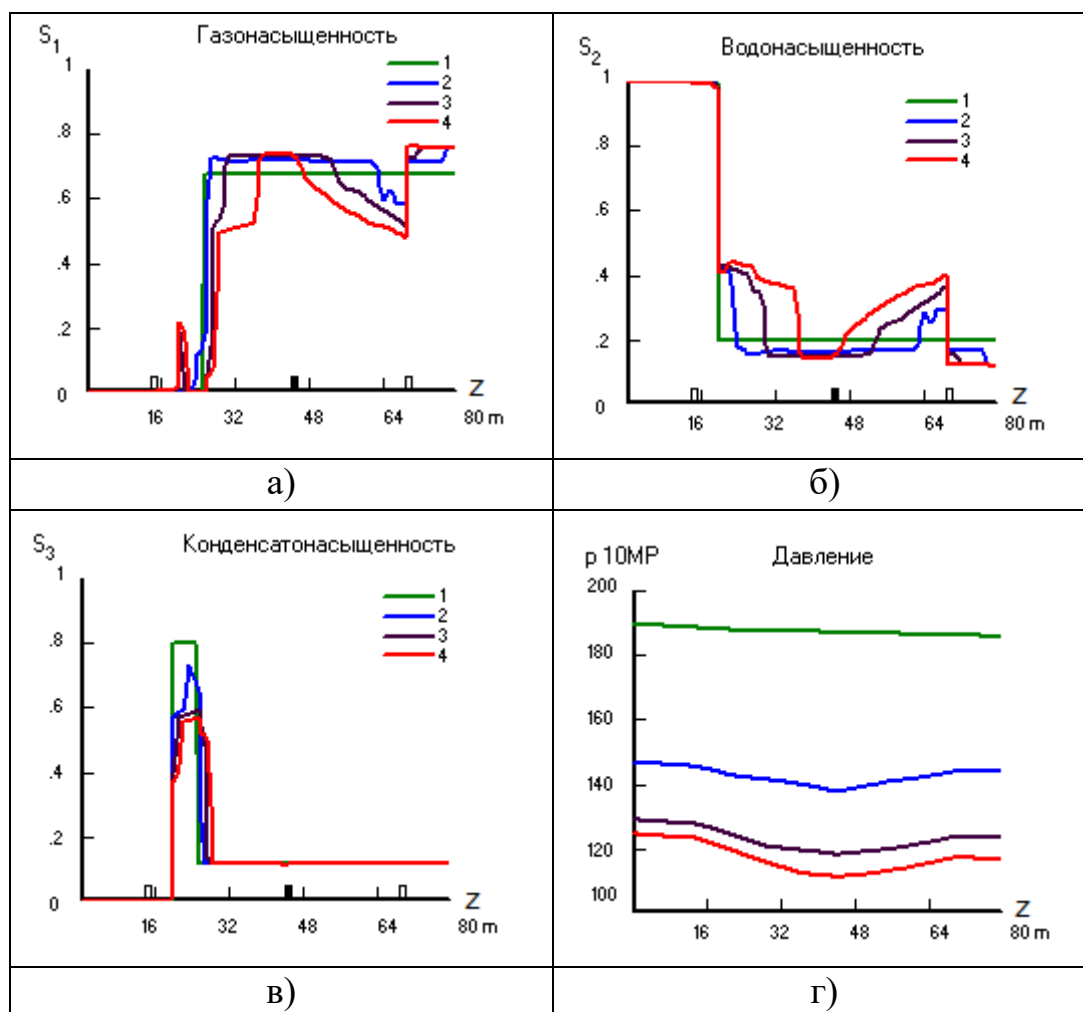


Рис. 5. Режим закачки воды под ВНК и в ГШ: 1 – начальное распределение, 2 – через 9 лет эксплуатации, 3 – через 18 лет эксплуатации, 4 – через 27 лет эксплуатации; □ – нагнетательный ряд ■ – добывающий ряд.

Интенсивное извлечение газа происходит как выше, так и ниже добывающего ряда за счет нагнетаемой воды (рис. 5а). Скачки водонасыщенности синхронны со скачками газонасыщенности (рис. 5б). Наблюдается прорыв воды в добывающий ряд к концу эксплуатации (рис. 5б). Изменение газо и конденсатонасыщенности аналогично режиму закачки воды под ГКК (рис. 5в). Удастся поддерживать более высокое давление, чем в предыдущих режимах за счет нагнетаемой воды (рис. 5г).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена математическая модель гидродинамических процессов многофазной фильтрации в газовом пласте при его заводнении. Дальнейшее развитие модели связано с определением функциональной связи кинетических

констант, получаемых в лабораторных опытах, уточнением описания механизма фильтрации.

Исследования показали существенное влияние заводнения как на распределение флюидов в пласте так и на давление. В частности выявлено, что закачка воды позволяет извлечь газ из областей, остающихся не охваченным воздействием в режиме истощения, среднее, газоотдача увеличивается. Таким образом подтверждается факт положительного влияния заводнения на гидродинамику пласта.

Однако при применении заводнения необходимо постоянное контролирование процесса газодобычи так как при прорыве воды к дабывающим скважинам эффективность заводнения падает. Поэтому при разработки месторождений с использованием заводнения необходимо регулирование темпов нагнетания воды.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Маскет М. Физические основы технологии добычи нефти// Гостопиздат, 1955, 12. с.
2. Веригин Н.Н. Нагнетания вязущих растворов в горные породы в целях повышения прочности и водопроницаемости основных гидротехнических сооружений // Изв. АН СССР, АТН, N5,1952, с.15-20.
3. Булыгин В.Я. Унифицированный ряд математических моделей вытеснения нефти водой // В сб.научн. трудов "Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости". Новосибирск, 1972, с66-85.
4. Христианович С.А. Движение газированной жидкости в пористой среде // ПММ, т., вып.2, 1941, с.97-104.
5. Рахматулин Х.А. Основы гидродинамики взаимопроникающих движений 33 ПММ, т. 20, вып. 2, 1956, с. 36-44.
6. Баренблатт Г.И., Ентов Е.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа // М., Недра, 1972, 288 с.
7. Магерамов Н.Х., Мирзаджанзаде А.Х. О фильтрации газоконденсатных смесей в пористой среде // Прикл. мат. и мех., 1970, 24, № 6, с.1094-1099.
8. Eilerts K.C. Integration of petrol differential equation for transient linear flow gas-condensate in fluids in porous structures// Soc. Petrol. Eng. Journal, N 4, 1974.
9. Баренблатт Г.И., Ентов Е.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа // М., Недра, 1972.

10. Розенберг М.Д. и др. Фильтрация газированной жидкости и других многокомпонентных смесей в нефтяных пластах// М., Недра, 1969, 453 с.
11. Курбанов А.К., Розенберг М.Д. Неизотермическая фильтрация многокомпонентных жидкостей // ВНИИ, М., Недра, 1968, с. 46-51.
12. Розенберг М.Д., Кундин С.А. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добычи нефти и газа// М., Недра, 197., 335 с.
13. Басниев К.С. Разработка месторождений природных газов, содержащих неуглеводородные компоненты// М., Недра, 1986.
14. Гуревич Г.Р., Николаевский В.Н. Оценка некоторых вариантов разработки газоконденсатных месторождений// Газ. пром., 1965. № 10, с.15-20.
15. Николаевский В.Н. Об уравнениях движения газоконденсатной смеси в пористых средах// Инж. ж., 1963, № 3, с.557-559.
16. Kniazeff V.I., Naville S.A. Two-phase flow of volatile hydrocarbons// Soc. Petrol. Eng. J., 1975, № 1, 37-44.
17. Аббасов И.Г., Джамалбеков М.А., Оруджалиев Ф.Г. Фильтрация газоконденсатной смеси трещиноватых коллекторах// Изв.АН АзССР, N 5, с.3-8.
- 20 Розенберг М.Д., Шовкринский Г.Ю. Основные проблемы рациональной разработки нефтегазоконденсатных месторождений // В сб. Разработка нефтегазовых и нефтегазоконденсатных месторождений. М., Наука, 1978, с. 12-20.
21. Борисов Ю.П. Определение дебита скважин при совместной работе нескольких рядов скважин// Труды Моск. нефтяного инс-та. 1951, вып. 11, с. 170-184.
24. Бурнашев В.Ф. Модифицированный метод "крупных частиц" для расчета фильтрации нефтегазоконденсатной смеси// ДАН АН РУз. № 54. 2000, с.34-26.
25. Khuzhayorov V.Kh., Burnashev V.F. Modelling the multiphase flow of an oil-gas-condensate system in porous media // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2001. Vol. 29, 67-82.