

УДК 622.276.03:532

В.В. Качалов, И.Л. Майков, Д.А. Молчанов, В.М. Торчинский

Газоконденсатная залежь как колебательная система осцилляторного типа

Ключевые слова: математическое моделирование, газоконденсат, фазовые переходы, фильтрация в пористой среде.

Keywords: mathematic modeling, gas condensate, changes of states, filtration in porous medium.

Смесь углеводородов газоконденсатных месторождений представляет собой сложную смесь метана и высших производных метанового ряда с высоким содержанием метана. Поведение газоконденсатной системы как в пласте на значительном удалении от скважины, так и вблизи нее определяется большим количеством факторов: исходным составом смеси, температурой, пластовым давлением, градиентом давления, свойствами породы коллектора. На процессы фильтрации влияют вязкость фаз, поверхностное натяжение, краевые углы, структура коллектора. Фазовая диаграмма смеси углеводородов содержит так называемую ретроградную область, в которой при снижении давления вплоть до давления максимальной конденсации возможно образование ретроградной жидкости, испаряющейся с дальнейшим уменьшением давления [1, 2]. Следует отметить, что наряду с нетипичной фазовой диаграммой для газоконденсатных смесей характерны дополнительные особенности в поведении функций фазовых проницаемостей, которые проявляются при фильтрации смеси углеводородов через пористую среду. Значения функций относительных фазовых проницаемостей и для газовой, и для жидкой фаз могут иметь нулевые значения.

Неустойчивость работы газоконденсатных месторождений иногда отмечалась на скважинах и в некоторых экспериментальных исследованиях [2–4]. Однако природа этих неустойчивостей остается неясной [3].

Целью настоящей статьи является теоретическое исследование особенностей фильтрации смеси углеводородов в пористой среде на примере бинарной смеси метан – н-бутан.

Математическая модель

Рассматривается одномерная нестационарная фильтрация двухфазной двухкомпонентной системы (метан – н-бутан) в изотермических условиях в предположении равенства давления в фазах при условии фазового равновесия (характерные времена фазовых переходов существенно меньше гидродинамических).

Фазовая диаграмма такой смеси [5, 6] показана на рис. 1. Состояние 1 на фазовой диаграмме соответствует входному граничному условию P_1 , состояние 2 – выходному граничному условию P_2 . За счет фильтрации смесь углеводородов переходит из состояния 1 в состояние 2. Обозначим длину, на которой давление изменяется от P_1 до P_2 , как L .

Процесс фильтрации при допущении о химической нейтральности компонентов в одномерном случае описывается уравнениями баланса массы для каждого компонента, записанными в дивергентной форме относительно молярных плотностей [3]:

$$m \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_j c_{ij} n_j s_j \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_j c_{ij} n_j U_j \right) = 0, \quad (1)$$

где m – пористость; индекс i соответствует компоненту (CH_4 , C_4H_{10}); индекс j соответствует фазе (1 – газ, 2 – жидкость); c_{ij} – мольная доля i -го компонента в j -й фазе двухфазной смеси; n_j – молярная плотность j -й фазы; s_j – объемная доля j -й фазы в смеси; U_j – скорость j -й фазы; t – время; x – координата.

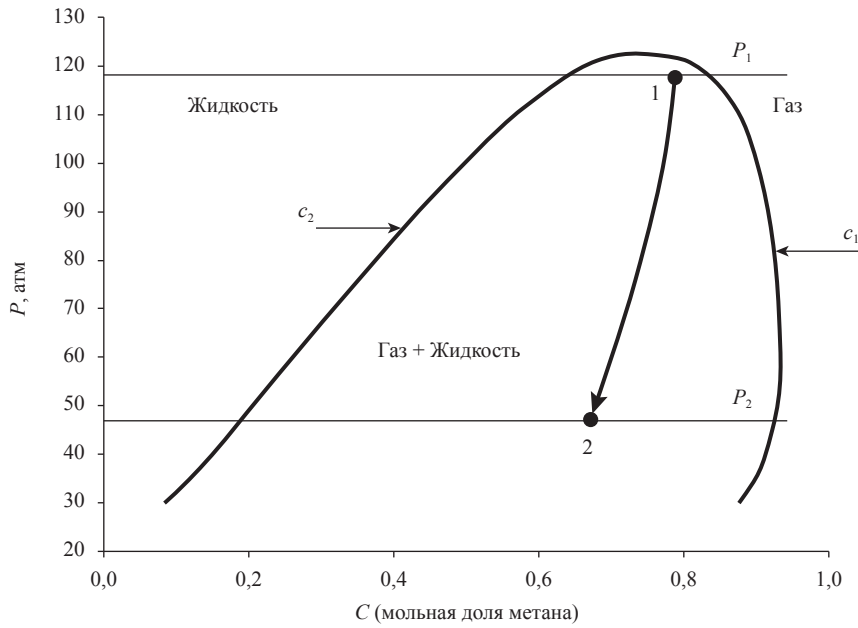


Рис. 1. Фазовая диаграмма бинарной смеси метан – н-бутан при температуре 310 К:
 $c_1(P)$ – кривая равновесных концентраций в газе;
 $c_2(P)$ – кривая равновесных концентраций в жидкости

Уравнения сохранения импульса записываются в приближении закона Дарси:

$$U_j = -k \frac{f_j(s_j)}{\mu_j} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2)$$

где k – абсолютная проницаемость; μ_j – коэффициент динамической вязкости j -й фазы; P – давление; f_j – функция относительной фазовой проницаемости j -й фазы.

Запишем уравнения состояния для газовой и жидкой фаз, выраженные через коэффициенты сжимаемости [2, 6]:

$$P = n_j z_j RT, \quad (3)$$

где z_j – коэффициент сжимаемости j -й фазы; R – газовая постоянная; T – температура смеси.

Равновесные концентрации компонент в обеих фазах зависят от давления и удовлетворяют условию

$$\sum_i c_{ij}(P) = 1. \quad (4)$$

Объемные доли фаз связаны соотношением

$$\sum_j s_j = 1. \quad (5)$$

Система уравнений дополняется граничными и начальными условиями.

Численный метод

При численном решении системы уравнений необходимо учитывать наличие особой точки, где существуют разрывы некоторых функций. Введем функцию газонасыщенности s (тогда влагонасыщенность запишется как $(1 - s)$), а также следующие обозначения: $c_1(P) = c_{\text{CH}_4,1}$ – мольная доля метана в газе; $c_2(P) = c_{\text{CH}_4,2}$ – мольная доля метана в жидкости (тогда мольная доля бутана в газе выразится как $(1 - c_1)$, а в жидкости – $(1 - c_2)$).

С учетом принятых обозначений систему (1)–(2) запишем в виде

$$\begin{aligned} & m \frac{\partial}{\partial t} (c_1 n_1 s + c_2 n_2 (1 - s)) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \left(c_1 n_1 \frac{f_1(s)}{\mu_1} + c_2 n_2 \frac{f_2(s)}{\mu_2} \right) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0, \\ & m \frac{\partial}{\partial t} ((1 - c_1) n_1 s + (1 - c_2) n_2 (1 - s)) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \left((1 - c_1) n_1 \frac{f_1(s)}{\mu_1} + (1 - c_2) n_2 \frac{f_2(s)}{\mu_2} \right) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0. \quad (6) \end{aligned}$$

Введем переменные

$$\begin{aligned} Y_1 &= c_1 n_1 s + c_2 n_2 (1 - s), \\ Y_2 &= (1 - c_1) n_1 s + (1 - c_2) n_2 (1 - s). \quad (7) \end{aligned}$$

Здесь новые переменные представляют собой количество молей метана и бутана в газовой и жидкой фазах, причем введенные таким образом функции непрерывны.

С учетом уравнений (7) и (3) систему уравнений (6) можно записать как

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y_1}{\partial t} &= \frac{k}{mRT} \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(c_1 \frac{f_1(s)}{\mu_1 z_1} + c_2 \frac{f_2(s)}{\mu_2 z_2} \right) P \frac{\partial P}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial Y_2}{\partial t} &= \frac{k}{mRT} \frac{\partial}{\partial x} \left(\left((1-c_1) \frac{f_1(s)}{\mu_1 z_1} + (1-c_2) \frac{f_2(s)}{\mu_2 z_2} \right) P \frac{\partial P}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Система (8) описывает изменение количества молей метана и бутана во времени и пространстве.

Складывая уравнения системы (6) и подставляя выражения для плотности из уравнения (3), получим уравнение для изменения порового давления:

$$\frac{\partial P D_{22}}{\partial t} = \frac{k}{m} \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{f_1(s)}{\mu_1 z_1} + \frac{f_2(s)}{\mu_2 z_2} \right) P \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (9)$$

$$\text{где } D_{22} = \left(\frac{s}{z_1} + \frac{1-s}{z_2} \right).$$

Запишем систему уравнений (8)–(9) в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_1}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(\left(c_1 \frac{f_1(s)}{\bar{\mu}_1 z_1} + c_2 \frac{f_2(s)}{\bar{\mu}_2 z_2} \right) P \frac{\partial p}{\partial X} \right), \\ \frac{\partial y_2}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(\left((1-c_1) \frac{f_1(s)}{\bar{\mu}_1 z_1} + (1-c_2) \frac{f_2(s)}{\bar{\mu}_2 z_2} \right) P \frac{\partial p}{\partial X} \right), \\ \frac{\partial p D_{22}}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(\left(\frac{f_1(s)}{\bar{\mu}_1 z_1} + \frac{f_2(s)}{\bar{\mu}_2 z_2} \right) P \frac{\partial p}{\partial X} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{где } y_1 &= \frac{Y_1}{Y_0}; \quad y_2 = \frac{Y_2}{Y_0}; \quad Y_0 = \frac{P_1}{RT}; \quad p = \frac{P}{P_1}; \quad X = \frac{x}{L}; \\ \tau &= \frac{t}{\tau_0}; \quad \tau_0 = \frac{m \mu_1(P_1) L^2}{k P_1}; \quad \bar{\mu}_1 = \frac{\mu_1}{\mu_1(P_1)}; \quad \bar{\mu}_2 = \frac{\mu_2}{\mu_1(P_1)}. \end{aligned}$$

Функция газонасыщенности определяется через значения переменных y_1 и y_2 :

$$s = \frac{C - c_2(p)}{c_1(p) - c_2(p)}, \quad (11)$$

где мольная доля метана в смеси

$$C = \frac{y_1}{y_1 + y_2}. \quad (12)$$

Правые части системы уравнений (10) с учетом (11) и (12) являются функциями p , y_1 и y_2 . Система уравнений (10)–(12) замыкается

начальными и граничными условиями для переменных y_1 , y_2 и p . При численном решении используется полностью неявная схема для всех указанных переменных.

Приближенный анализ

Для решения системы уравнений (8)–(11) необходимо дополнительно иметь функциональные зависимости $c_1(p)$, $c_2(p)$, $z_1(p)$ и $z_2(p)$, которые вычисляются из условий фазового равновесия [5, 6]. Вид кривых c_1 , c_2 для смеси метан – н-бутан отражен на рис. 1. Функциональные зависимости вязкостей $\mu_1(p)$, $\mu_2(p)$ вычисляются согласно алгоритму, представленному в работе [6]. Функции $c_2(P)$, $z_1(P)$, $z_2(P)$, $\mu_1(P)$ и $\mu_2(P)$ являются непрерывными и монотонными на отрезке $[P_2; P_1]$, а функция $c_1(P)$ – унимодальной. Функциональные зависимости $f_1(s)$ и $f_2(s)$ имеют вид [6, 7]:

$$\begin{aligned} f_1(s) &= \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq s \leq s_{1k}; \\ [(s - s_{1k}) / (1 - s_{1k})]^{3,5}, & \text{если } s_{1k} \leq s \leq 1; \end{cases} \\ f_2(s) &= \begin{cases} [(s_{2k} - s) / s_{2k}]^{3,5}, & \text{если } 0 \leq s \leq s_{2k}; \\ 0, & \text{если } s_{2k} \leq s \leq 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

где s_{1k} и s_{2k} – параметры. В работе принимались значения $s_{1k} = 0,35$ и $s_{2k} = 0,8$. Основная особенность зависимостей (13) состоит в том, что существуют области, в которых каждая из функций становится равной 0, т.е. скорость ее движения равна 0. Физически это означает возникновение областей, в которых фаза не является непрерывной, а присутствует в виде пузырей или капель, которые неподвижны.

Рассмотрим упрощенную постановку задачи. Предположим, что вязкости фаз постоянны и

$$\alpha_1 = \frac{1}{\bar{\mu}_2(P_1)} \ll 1, \quad (14)$$

коэффициенты сжимаемости равны 1. Тогда систему уравнений для вычисления y_1 и p (см. (10)) можно представить в виде (в предположении $\Delta p = 1 - p_2 \ll 1$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_1}{\partial \tau} &= \bar{p} \frac{\partial}{\partial X} \left((c_1 f_1(s) + \alpha_1 c_2 f_2(s)) \frac{\partial p}{\partial X} \right), \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= \bar{p} \frac{\partial}{\partial X} \left((f_1(s) + \alpha_1 f_2(s)) \frac{\partial p}{\partial X} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Заменим зависимости относительных фазовых проницаемостей (13) на модельные функции θ :

$$\begin{aligned} f_1(s) &= k_1\theta(s - s_{1k}), \\ f_2(s) &= k_2(1 - \theta(s - s_{2k})), \end{aligned} \quad (16)$$

где $k_1 < 1$; $k_2 < 1$.

Пусть значение газонасыщенности находится внутри интервала (s_{1k}, s_{2k}) , т.е. $f_1(s) = k_1$ и $f_2(s) = k_2$. Рассмотрим режим течения, который установился через достаточно большой начальный промежуток времени. Систему уравнений (15) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_1}{\partial \tau} &= \bar{p} \left(\frac{\partial p}{\partial X} \right)^2 \left(k_1 \frac{\partial c_1}{\partial p} + \alpha_1 k_2 \frac{\partial c_2}{\partial p} \right), \\ \frac{d^2 p}{dX^2} &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом, процесс фильтрации удовлетворяет системе уравнений (17): в каждый момент времени рассматриваем установившийся режим по давлению и нестационарный процесс фильтрации. Решение для давления имеет вид

$$p = 1 - \Delta p X. \quad (18)$$

Согласно первому уравнению системы (17) и с учетом (14):

$$\frac{\partial y_1}{\partial \tau} = k_1 \bar{p} \left(\frac{\partial p}{\partial X} \right)^2 \frac{\partial c_1}{\partial p} < 0. \quad (19)$$

Так как $\max \left| \frac{\partial c_1}{\partial p} \right|$ достигается при $X \rightarrow 0$, то и $\max \left| \frac{\partial y_1}{\partial \tau} \right|$ достигается при $X \rightarrow 0$. Уменьшение

y_1 приводит к уменьшению C и s (согласно (12) и (11)). Пусть за время $\Delta \tau$ газонасыщенность s в точке ΔX ($\Delta X \ll 1$) уменьшилась до s_{1k} , т.е. $f_1(s) = 0$. Установившееся давление удовлетворяет следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 p_1}{dX^2} &= 0, p_1(X=0) = 1, \\ \frac{d^2 p_{II}}{dX^2} &= 0, p_{II}(X=1) = 1 - \Delta p, \\ p_1(X=X_p) &= p_{II}(X=X_p), \\ k_1 \frac{dp_1}{dX}(X=X_p) &= \alpha_1 k_2 \frac{dp_{II}}{dX}(X=X_p), \end{aligned} \quad (20)$$

где $X_p = \Delta X$.

Решение задачи (20) дает значение давления в точке $X_p = \Delta X$:

$$p_p = \frac{1 - X_p + \alpha X_p (1 - \Delta p)}{1 - X_p + \alpha X_p}, \quad (21)$$

где $\alpha = \alpha_1 \frac{k_2}{k_1}$.

Таким образом, возникает зона, в которой давление близко к входному граничному, но $s < s_{1k}$.

Пусть следующая точка, в которой s достигла величины s_{1k} , находится на расстоянии $X_p = \Delta X_1 = 2\Delta X$. Тогда установившееся давление определяется из решения задачи

$$\begin{aligned} \frac{d^2 p_I}{dX^2} &= 0, p_I(X=0) = 1, \\ \frac{d^2 p_{II}}{dX^2} &= 0, p_{II}(X=1) = 1 - \Delta p, \\ p_I(X=X_p) &= p_{II}(X=X_p), \\ \alpha \frac{dp_I}{dX}(X=X_p) &= \frac{dp_{II}}{dX}(X=X_p), \end{aligned} \quad (22)$$

а давление в точке X_p – выражением

$$p_p = \frac{\alpha + (1 - \Delta p)X_p - \alpha X_p}{\alpha + X_p - \alpha X_p}. \quad (23)$$

Выражение (23) последовательно дает решение для фронта давления в точках $X_p = (n + 1)$ и $\Delta X(n \geq 1)$, в которых газонасыщенность достигает величины s_{1k} (т.е. процесс фильтрации является последовательностью стационарных процессов (по давлению), отличающихся положением фронта давления, на котором газонасыщенность достигает величины s_{1k}).

Зависимости (21) и (23) p_p от X_p представлены на рис. 2.

Аппроксимируем линейной зависимостью зависимость p_p от X_p (рис. 3):

$$\begin{aligned} p_p &= 1 - \beta X_p, X_p \leq X_b, \\ p_p &= 1 - \Delta p + \gamma(1 - X_p), X_p \geq X_b, \\ X_b &= \frac{\Delta p - \gamma}{\beta - \gamma}, \\ p_b &= 1 - \beta \frac{\Delta p - \gamma}{\beta - \gamma}. \end{aligned} \quad (24)$$

Рассмотрим движение по прямой ab . Введем обозначения: y_1^0 – значение y_1 , при котором газонасыщенность достигает критического значения $s = s_{1k}$; y_1^{in} – значение y_1 при $\tau = 0$, $y_1^{in} > y_1^0$. Точки на прямой ab соответствуют времени достижения критического значения

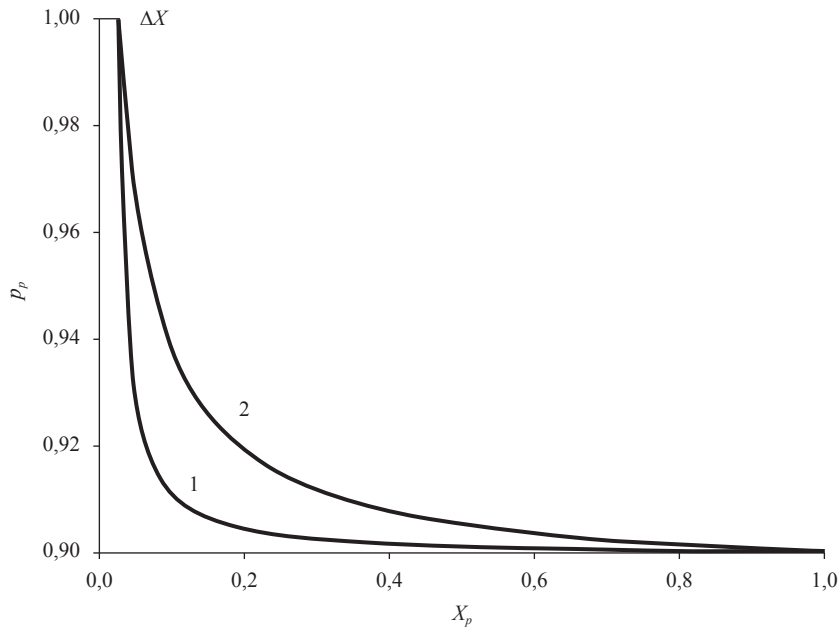


Рис. 2. Зависимость p_p от X_p при $\alpha = 0,01$ (1) и $\alpha = 0,05$ (2)

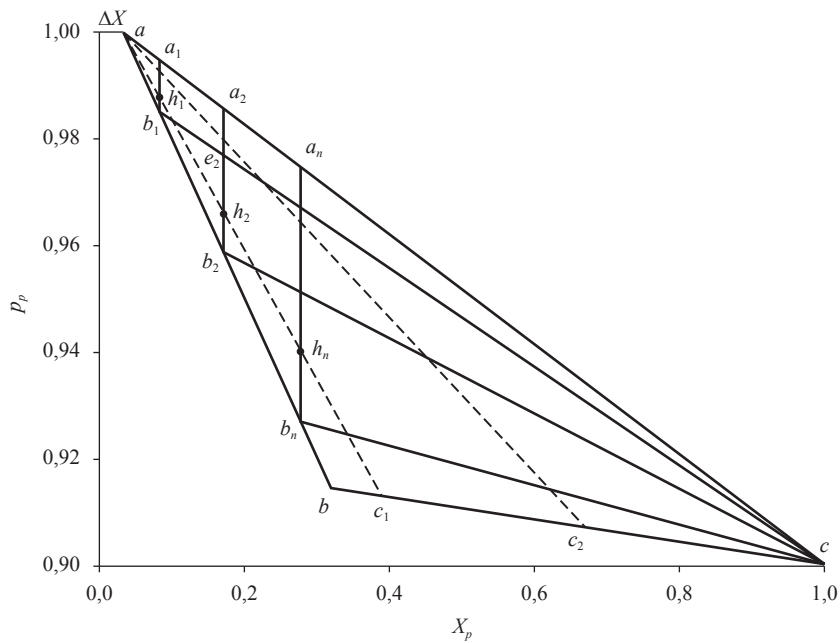


Рис. 3. Аппроксимационная зависимость p_p от X_p

газонасыщенности s_{1k} . Новое распределение давления ab_1c достигается в два шага:

1) согласно уравнению (19), y_1 за время τ_1 достигает значения y_1^0 . Изменение y_1 определяется по формуле

$$\Delta y_1(X_{b_1}) = \bar{p} k_1 \chi_1^2 \frac{\partial c_1}{\partial p}(p_{a_1}) \tau_1 < 0, \tag{25}$$

где χ_1 – градиент давления $\frac{\partial p}{\partial X}$ на прямой ac ;

2) происходит изменение давления на величину $\Delta p_{b_1}(X_{b_1}) = p_{b_1} - p_{a_1}$ (достижение точки b_1). Полное изменение y_1 определяется по формуле (при этом уже $s < s_{1k}$, соответственно, $y_1 < y_1^0$)

$$\Delta y_1(X_{b_1}) = \bar{p} k_1 \chi_1^2 \frac{\partial c_1}{\partial p}(p_{a_1}) \tau_1 + c_1 \Delta p_{b_1}(X_{b_1}) < 0. \tag{26}$$

Пусть в момент времени τ_2 распределение давления соответствует кривой ab_2c .

Изменение y_1 за время τ_2 определяется по формуле (согласно (19) и (26))

$$\Delta y_1(X_{b_2}) = \bar{p}k_1\chi_1^2 \frac{\partial c_1}{\partial p}(p_{a_2})\tau_1 + c_1\Delta p_{e_2}(X_{b_2}) + \bar{p}k_1\chi_2^2 \frac{\partial c_1}{\partial p}(p_{e_2})(\tau_2 - \tau_1), \quad (27)$$

где $\Delta p_{e_2}(X_{b_2}) = p_{a_2} - p_{e_2}$, χ_2 – градиент давления $\frac{\partial p}{\partial X}$ на прямой b_1c .

Первые два члена отвечают за изменение y_1 за время τ_1 , третий член – за изменение y_1 за время $\tau_2 - \tau_1$, при этом газонасыщенность достигает критического значения $s = s_{1k}$ (соответственно, $y_1 = y_1^0$).

Полное изменение y_1 определяется по формуле (с учетом изменения давления)

$$\Delta y_1(X_{b_2}) = \bar{p}k_1\chi_1^2 \frac{\partial c_1}{\partial p}(p_{a_2})\tau_1 + \bar{p}k_1\chi_2^2 \frac{\partial c_1}{\partial p}(p_{e_2})(\tau_2 - \tau_1) + c_1(\Delta p_{p_2}(X_{b_2}) + \Delta p_{e_2}(X_{b_2})), \quad (28)$$

где $\Delta p_{p_2}(X_{b_2}) = p_{b_2} - p_{pe_2}$.

Таким образом, можно последовательно получить время достижения любой точки распределения давления p_p (например, распределение $ab_n c$, см. рис. 3).

Система для определения $\Delta y_1(X_{b_n})$ упрощается, если предположить, что $\frac{\partial c_1}{\partial p}(p_n) = \varphi = const$ и $\chi_n^2 = \lambda^2$, причем $|\gamma| < |\lambda| < |\Delta p|$. Тогда для момента времени τ_n можно записать следующее уравнение:

$$\Delta y_1(X_n) = \bar{p}k_1\lambda^2\varphi\tau_n + c_1\Delta p_n(X_n), \quad (29)$$

где $X_n = (n + 1)\Delta X$, $n \geq 1$ и

$$\Delta p_n(X_n) \approx \begin{cases} X_n(\Delta p - \beta), & X_n \leq X_b, \\ (1 - X_n)(\gamma - \Delta p), & X_n > X_b. \end{cases} \quad (30)$$

Уравнение (29) с учетом (11), (12) можно записать в виде

$$\tau_n = \frac{1}{k_1\lambda^2\varphi} \left(\Delta s_n(c_1(p_n) - c_2(p_n)) - \frac{1}{\bar{p}}c_1(p_n)\Delta p_n(X_n) \right), \quad (31)$$

где $\Delta s_n = s_{1k} - s_n$. В формулах (29) и (31) $\lambda = \gamma$ при $X_n > X_b$.

Физически точка b разделяет два режима течения. Поток в точках b_i прямой ab лимитируется условиями выше по течению (проводимость выше по потоку определяется свойствами жидкой фазы, ниже – свойствами газовой фазы). Поток в точках c_i прямой bc лимитируется условиями ниже по потоку (и хотя проводимость ниже по потоку определяется свойствами газовой фазы, величина потока ограничивается малым градиентом давления на прямой bc).

При достижении величины газонасыщенности $s < s_{1k}$, согласно (26) или (28), начинается процесс испарения (увеличение y_1):

$$\frac{\partial y_1}{\partial \tau} = \alpha k_1 \bar{p} \beta^2 \psi > 0, \quad (32)$$

где $\psi = \frac{\partial c_2}{\partial p}(p_n)$.

При движении по прямой bc (точки c_1 и c_2 , см. рис. 3) в точках прямой ab возникают дополнительные члены, связанные с положительным скачком давления (например, распределению давления ac_1c на рис. 3 соответствует $\Delta p_n = p_{h_n} - p_{b_n} > 0$), т.е. общее изменение y_1 на этапе испарения описывается формулой, аналогичной (29):

$$\frac{\partial y_1}{\partial \tau} = \alpha k_1 \bar{p} \beta^2 \psi + c_1 \Delta p_n > 0. \quad (33)$$

При этом согласно (34) происходит увеличение y_1 и $s > s_{1k}$. При достижении правой границы профиль давления восстанавливается.

Рассмотрим возможные режимы фильтрации. Движение в системе осуществляется за счет заданного перепада давления, конкретные значения давления определяют участок фазовой диаграммы и все остальные свойства колебательной системы. За счет внутренних свойств системы происходит уменьшение расхода: выпадение конденсата в ретроградной области, уменьшение значения фазовой проницаемости газа и проводимости выше по потоку (переход с прямой ac на прямую ab) или уменьшение расхода за счет уменьшения градиента давления (переход с прямой ac на прямую bc). В рассмотренном выше случае газовая фаза останавливается. Хотя плотность жидкой фазы выше газовой, скорость ее движения существенно ниже скорости газовой фазы (см. (14)). Поэтому энергия системы уменьшается (стадия возврата энергии во внешний источник) и достигает некоторого минимального

значения, при этом ΔE_{out}^{max} – максимальное количество отданной энергии за период. Затем начинается увеличение расхода (испарение выпавшего конденсата, увеличение фазовой проницаемости газа и увеличение проводимости выше по потоку). Энергия системы начинает возрастать за счет вовлечения в движение остановившейся газовой фазы (стадия отбора энергии из внешнего источника) и достигает некоторого максимального значения, при этом ΔE_{in}^{max} – максимальное количество подведенной энергии из внешней системы за период. Если

$$\Delta E_{out}^{max} - \Delta E_{in}^{max} > 0, \quad (34)$$

то в течение каждого периода колебаний энергия у системы отбирается, и происходят затухающие колебания. Если наоборот:

$$\Delta E_{out}^{max} - \Delta E_{in}^{max} < 0, \quad (35)$$

то энергия системы возрастает, и колебания возрастают. Таким образом, система представляет автоколебательную систему осцилляторного типа [8]. Здесь имеется источник питания системы энергией, причем подвод энергии происходит не произвольно, а осуществляется при помощи механизма управления, приводимого в действие самой системой. Механизм управления действует как обратная связь между колебательной системой и источником энергии,

обеспечивая подвод энергии в нужный момент периода колебаний.

Проведенные исследования фильтрации смеси углеводородов показали, что возникающие колебания описываются колебательной системой осцилляторного типа. Необходимым условием возникновения колебаний является нахождение газоконденсатной системы в ретроградной области на фазовой диаграмме, когда при понижении давления смеси происходит выпадение жидкости. Свойства колебательной системы однозначно определяются граничными условиями для давления (выделяется область по давлению на фазовой диаграмме смеси) и мольной долей легкого углеводорода на входе (вычисляется конкретная точка на фазовой диаграмме смеси). Наличие областей с нулевой фазовой проницаемостью является основой осуществления обратной связи колебательной системы. В зависимости от свойств колебательной системы возможны как затухающие, так и незатухающие колебания – возникновение автоколебаний. Таким образом, колебательная система осцилляторного типа в зависимости от условий может реализовывать различные режимы фильтрации как общей системы, так и ее отдельных элементов. Так, в промышленных условиях реализуется режим образования зон неподвижного ретроградного газового конденсата или защемленной газовой фазы, обогащенной метаном.

Список литературы

1. Вяхирев Р.И. Разработка и эксплуатация газовых месторождений / Р.И. Вяхирев, А.И. Гриценко, Р.М. Тер-Саркисов. – М.: Недра, 2002. – 880 с.
2. Зайченко В.М. Моделирование процессов фильтрации углеводородов в газоконденсатном пласте / В.М. Зайченко, И.Л. Майков, В.М. Торчинский и др. // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – № 5. – С. 701–706.
3. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика / В.Н. Николаевский. – М.: Недра, 1996. – 447 с.
4. Митлин В.С. Подземная гидромеханика сложных углеводородных смесей / В.С. Митлин // ВИНТИ. – 1991. – Т. 4. – С. 154–222.
5. Баталин О.Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов / О.Ю. Баталин, А.И. Брусиловский, М.Ю. Захаров. – М.: Недра, 1992. – 272 с.
6. Директор Л.Б. Одномерная нестационарная модель двухфазной фильтрации газоконденсатной смеси / Л.Б. Директор, В.В. Качалов, И.Л. Майков и др.; препринт // ОИВТ РАН. – М., 2000 – № 2 (441). – 46 с.
7. Вафина Н.Г. К определению фазовых проницаемостей в случае многокомпонентной фильтрации с фазовыми переходами / Н.Г. Вафина, С.Н. Закиров, П.А. Юфин // Известия вузов. – 1988. – № 9. – С. 59–63. – (Серия «Нефть и газ»).
8. Магнус К. Колебания: введение в исследование колебательных систем / К. Магнус; пер. с нем. – М.: Мир, 1982 – 304 с.