

УДК 622.324

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СУМІШІ У ГАЗОКОНДЕНСАТНОМУ ПОКЛАДІ

О. В. Бурачок

ЦНДЛ ВАТ "Укрнафта", 76019, м. Івано-Франківськ, Північний бульвар ім. Пушкіна, 2,
тел. (0342) 776135, e-mail: 76018sif@ukr.net

В процессе разработки газоконденсатных месторождений возникает сложность при расчете основных показателей. Очень часто фактические данные значительно отличаются от проектных. Это связано с тем, что при проектировании не учитываются изменения компонентного состава газоконденсатоводяной смеси, происходящие вследствие ретроградной конденсации. В данной работе изложена математическая модель процесса фильтрации газоконденсатной смеси с учетом изменения ее компонентного состава. Модель включает три уравнения – дифференциальное, рекуррентное и интегральное. Эти уравнения с некоторыми допущениями дают возможность достаточно точно описать происходящие в пласте процессы. Методика может быть использована при проектировании разработки газоконденсатных месторождений.

The problem of calculation the development indexes arises during the process of gas-condensate fields development. Very often the actual data are greatly vary from the projected ones. This happen due to neglect of gas-condensate-water mixture component change that took place in the reservoir due to retrograde condensation. The mathematical model of gas-condensate mixture filtration process with consideration of component change is given in this paper. The model includes three equations, one of which is differential, one recurrent and an integral. This system of equations with some assumptions aloud us to give sharp estimation for description of the processes that take place in the reservoir. This method can be used in projection of gas-condensate fields development.

Вступ

Під час проектування газоконденсатних родовищ (ГКР) основна увага повинна приділятися максимальному вилученню пропан-бутанових фракцій [1]. В більшості ГКР початковий пластовий тиск є вищим за тиск початку конденсації, тому їх розробку від початку проектують на природному режимі (на виснаження). В процесі розробки відбувається закономірне поступове зниження пластового тиску. Оскільки необхідною умовою фільтрації флюїдів є наявність перепаду тиску, досягнення тиску початку конденсації відбувається спочатку в межах депресійних воронок, тобто навколо видобувних свердловин. Таким чином, у потоці з'являється додаткова фаза. На рис. 1 зображено теоретичний характер появи додаткової (конденсатної) фази у потоці.

Зрозуміло, що характер кривої $q_k(r)$ буде визначатися властивостями (компонентним складом) газоконденсатної суміші. Дуже часто при розрахунках показників розробки появу додаткової фази нехтують, а враховують тільки наявність однієї (газ) або двох (газ + вода) фаз. В даній роботі дається спроба подати математичну модель розрахунку, яка б враховувала наявність конденсату у потоці.

Пихачовим та Ісаєвим [2] запропонована система з двох диференціальних рівнянь, яка описує фільтрацію газоконденсатної суміші. Ці рівняння отримані ними на основі рівняння нерозривності та закону фільтрації Дарсі. Недоліком даної методики є неврахування фактичних фазових переходів із зміною тиску.

В основу моделі, розробленої автором, покладено методики, викладені у [3, 4], для розрахунку неізотермічної та ізотермічної фільтрації

газу у пористому середовищі за наявності води у потоці. Автором запропоновано замінити воду сконденсованим газом, а з метою спрощення моделі розглядати фільтрацію тільки двокомпонентної суміші (виключивши наявність води).

Опис математичної моделі

Запропонована модель містить у собі три компоненти (гірська порода, газ, конденсат) та дві фази – газоподібну і рідку. Введемо позначення 0, 1 і 2 відповідно для породи, газу та рідини (конденсату). Швидкості руху газу та конденсату будуть становити v_1 та v_2 , порода нерухома, тому $v_0 = 0$. Вражаємо, що ефект Джоуля-Томсона у ПЗП відсутній, а проявляється тільки безпосередньо у перфораційних отворах (стрибкоподібне зменшення температури на вибої), тобто у пласті відбувається ізотермічна фільтрація газоконденсатної суміші.

Рівняння нерозривності фаз запишемо у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 \alpha) + \text{div}(\rho_1 \alpha \bar{v}_1) = \frac{1}{m}(I_{12} - I_{21}); \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_2(1 - \alpha)] + \text{div}[\rho_2(1 - \alpha)\bar{v}_2] = \frac{1}{m}(I_{21} - I_{12}), \quad (2)$$

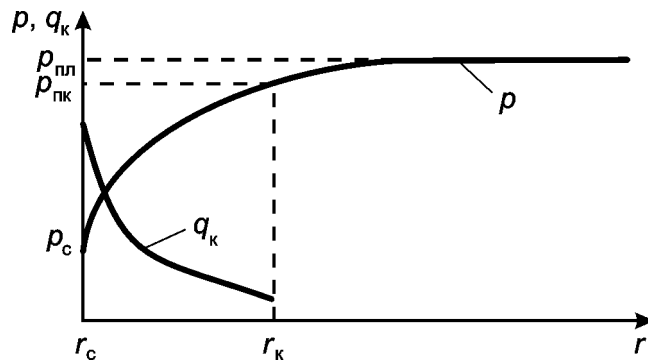
де: ρ_1 і ρ_2 – густини газу та конденсату; α – коефіцієнт газонасиченості; m – коефіцієнт пористості; I_{12} – швидкість ретроградної конденсації; I_{21} – швидкість ретроградного випаровування.

Об'ємні концентрації фаз подамо як

$$m_0 = 1 - m; \quad (3)$$

$$m_1 = m\alpha; \quad (4)$$

$$m_2 = m(1 - \alpha). \quad (5)$$



$p_{пл}$ – пластовий тиск, $p_{пк}$ – тиск початку конденсації, p_c – вибійний тиск, r_c – радіус свердловини

Рисунок 1 — Характер зростання кількості конденсату у потоці при наближенні до свердловини

Приймаємо, що фільтрація відбувається в межах тисків $p_{пв} < p < p_{пк}$ ($p_{пв}$ – тиск початку регроградного випаровування; $p_{пк}$ – тиск початку конденсації), а тому $I_{21} = 0$. Відповідно рівняння (1) і (2) перепишемо таким чином:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 \alpha) + \text{div}(\rho_1 \alpha \bar{v}_1) = \frac{1}{m} I_{12}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_2(1 - \alpha)] + \text{div}[\rho_2(1 - \alpha)\bar{v}_2] = -\frac{1}{m} I_{12}. \quad (7)$$

Будемо вважати, що густина газу і конденсату залишається сталою, тоді рівняння збереження імпульсу будуть виглядати так:

$$m\rho_1 \alpha(p) \frac{d\bar{v}_1}{dt} + \text{grad}(m\alpha(p)p) - \quad (8)$$

$$- m\rho_1(\bar{F}_1 + \bar{R}_1)\alpha(p) - \bar{v}_1 I_{12} = 0;$$

$$m\rho_2[1 - \alpha(p)] \frac{d\bar{v}_2}{dt} + \text{grad}(m[1 - \alpha(p)]p) - \quad (9)$$

$$- m\rho_2(\bar{F}_2 + \bar{R}_2)[1 - \alpha(p)] + \bar{v}_2 I_{12} = 0,$$

де: p – тиск у системі газ-конденсат; \bar{F} – дійсні масові сили; \bar{R} – рівнодійна фіктивних масових сил.

Фіктивні масові сили опорів для кожної з фаз визначимо як

$$\bar{R}_1 = -\frac{\mu_1 m_1 \bar{v}_1}{k k'_1 \rho_1} + \frac{p}{m_1 \rho_1} \text{grad} m_1; \quad (10)$$

$$\bar{R}_2 = -\frac{\mu_2 m_2 \bar{v}_2}{k k'_2 \rho_2} + \frac{p}{m_2 \rho_2} \text{grad} m_2, \quad (11)$$

де: k – проникність пласта; k'_1 і k'_2 – відносні фазові проникності для газу і конденсату. Позначимо через k_1 і k_2 проникності для відповідних фаз, тобто $k_1 = k k'_1$, $k_2 = k k'_2$.

Перші доданки у формулах (10) та (11) характеризують закон Дарсі, а другі – сили опору, що виникають внаслідок розширення порового простору.

Найбільшою проблемою є визначення фазових проникностей. Найкращий і найточніший спосіб – проведення лабораторних досліджень, однак в Україні подібні дослідження щодо визначення фазової проникності для конденсату

ніколи не проводилися і навряд чи будуть проводитись у найближчому майбутньому. Для наближених розрахунків можна скористатися методикою, наведеною у [2] для розрахунку процесу фільтрації газованої рідини.

Підставивши (10) і (11) у (8) і (9), отримаємо

$$\bar{v}_1 = -\frac{k_1}{m_1 \mu_1} \text{grad} p = -\frac{k_1}{m_1 \mu_1} \frac{dp}{dr}; \quad (12)$$

$$\bar{v}_2 = -\frac{k_2}{m_2 \mu_2} \text{grad} p = -\frac{k_2}{m_2 \mu_2} \frac{dp}{dr}. \quad (13)$$

Оскільки компоненти знаходяться в одному термодинамічному середовищі, то рівняння збереження енергії запишемо у вигляді

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\Lambda \text{grad} T] - \bar{W} \text{grad} T + Q, \quad (14)$$

де: T – абсолютна температура середовища; $^\circ\text{C}$ – усереднена теплоємність; Λ – усереднена теплопровідність; \bar{W} – усереднений вектор конвективного перенесення теплоти.

$$C = (1 - m)c_0 \rho_0 + m\alpha(p)\rho_1 c_{p1} + \quad (15)$$

$$+ m[1 - \alpha(p)]\rho_2 c_{p2};$$

$$\Lambda = (1 - m)\lambda_0 + m\alpha(p)\lambda_1 + m[1 - \alpha(p)]\lambda_2; \quad (16)$$

$$\bar{W} = m\alpha(p)\rho_1 c_{p1} \bar{v}_1 + m[1 - \alpha(p)]\rho_2 c_{p2} \bar{v}_2, \quad (17)$$

де: c_{p1} – коефіцієнт ізобарної теплоємності для і-тої фази; λ_i – коефіцієнт теплопровідності для і-тої фази.

Теплотою, що виділяється в процесі фазових перетворень знехтуємо, тобто у рівнянні (14) $Q = 0$.

Отже, ми отримали п'ять диференціальних рівнянь (8), (9), (12) – (14), що містять 7 невідомих: ρ_1 , ρ_2 , \bar{v}_1 , \bar{v}_2 , $\alpha(p)$, p , T . Додатково запишемо два рівняння. Перше – рівняння стану для газової фази за умови, що $p = p_1 = p_2$, а друге для визначення коефіцієнта газонасиченості, на основі лабораторних досліджень газоконденсатної суміші

$$p = z_1(p, T) \frac{\rho_1 R T}{M_1}; \quad (18)$$

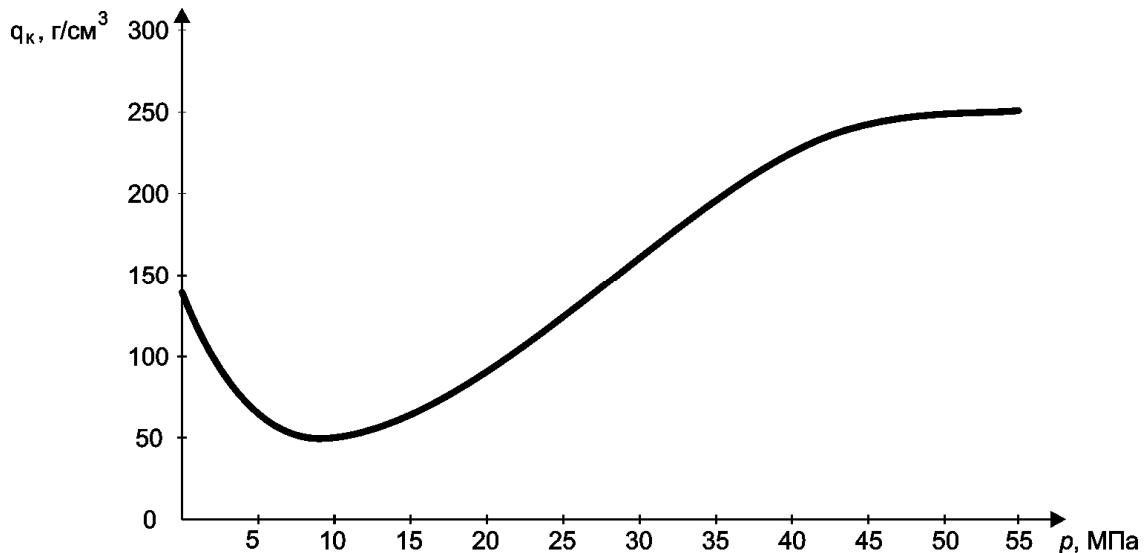


Рисунок 2 — Характер залежності вмісту конденсату у пластовому газі від пластового тиску

$$\alpha(p) = 1 - \int_{p_{пк}}^p q_k(p) dp, \quad (19)$$

де: $z_1(p, T)$ – коефіцієнт стисливості газу; R – універсальна газова стала; M_1 – усереднена молекулярна маса пластового газу; q_k – конденсатний фактор.

У випадку, якщо q_k вимірюється в $см^3/м^3$, рівняння (19) запишеться у вигляді

$$\alpha(p) = 1 - 10^{-6} \int_{p_{пк}}^p q_k(p) dp. \quad (20)$$

За результатами лабораторних досліджень залежність для визначення пластового вмісту конденсату, як правило, подається у вигляді графіка, наведеного на рис. 2 (для деякого умовного родовища).

Розглянемо отриману систему з семи диференціальних рівнянь та спробуємо її спростити з метою практичного застосування. Враховуючи вищеприйняте припущення про сталість у часі густини газу та конденсату, можна вважати їх відомими за результатами лабораторних досліджень. У формулах (8) і (9) дійсні масові сили є векторною сумою сили тяжіння, сили Архімеда та капілярних сил. Якщо не враховувати властивості породи продуктивного горизонту (його гідрофільність чи гідрофобність), та вважати, що приплив флюїдів відбувається безперервно, то на процес фільтрації будуть впливати тільки гравітаційна та Архімедові сили. Таким чином, масові сили будуть дорівнювати

$$\bar{F}_1 = \rho_2 g V_1 - M_1 g; \quad (21)$$

$$\bar{F}_2 = \rho_1 g V_2 - M_2 g, \quad (22)$$

де V_i і M_i – об'єми і маси i -тої фази. З врахуванням того, що $M_i = \rho_i V_i$

$$\bar{F}_1 = g V_1 (\rho_2 - \rho_1); \quad (23)$$

$$\bar{F}_2 = g V_2 (\rho_1 - \rho_2). \quad (24)$$

Підставимо (10), (11), (23), (24) у (8) і (9), врахувавши, що

$$V_1 = m \alpha(p) V, \quad V_2 = m [1 - \alpha(p)] V,$$

де V – об'єм покладу, та виконавши деякі перетворення, отримаємо

$$m \rho_1 \alpha(p) \frac{d\bar{v}_1}{dt} + m \frac{d(p \alpha(p))}{dr} - m^2 g \rho_1 (\rho_2 - \rho_1) V \alpha(p) + \frac{\mu_1 m^2}{k_1} \alpha(p) \bar{v}_1 + m p \frac{d\alpha(p)}{dr} - \bar{v}_1 I_{12} = 0; \quad (25)$$

$$m \rho_2 [1 - \alpha(p)] \frac{d\bar{v}_2}{dt} + m \frac{dp [1 - \alpha(p)]}{dr} + m^2 g \rho_2 (\rho_2 - \rho_1) V [1 - \alpha(p)] + \frac{\mu_2 m^2}{k_2} [1 - \alpha(p)] \bar{v}_2 - m p \frac{d[1 - \alpha(p)]}{dr} + \bar{v}_2 I_{12} = 0. \quad (26)$$

Розглянемо одержані рівняння, невідомими в яких є такі величини: тиск у системі p , швидкості фільтрації фаз \bar{v}_1 і \bar{v}_2 , коефіцієнт газонасиченості, час та горизонтальна координата r . Попередньо було прийнято, що теплота в процесі фазових перетворень не виділяється, що свідчить про сталість температури у термодинамічній системі. Таким чином, можна вважати температуру відомою і рівною пластовій, а рівняння (14)–(17) не враховувати під час опису процесу фільтрації, що досліджується. Врахуємо формули (12) і (13) та перепишемо попередньо одержані рівняння

$$-\frac{k_1}{\mu_1} \rho_1 \frac{dp}{dr} \frac{d\alpha(p)}{dr} + m \frac{dp \alpha(p)}{dr} - m^2 g \rho_1 (\rho_2 - \rho_1) V \alpha(p) - m \frac{dp}{dr} + m p \frac{d\alpha(p)}{dr} + \frac{k_1 I_{12}}{m \alpha(p) \mu_1} \frac{dp}{dr} = 0; \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{k_2}{\mu_2} \rho_2 \frac{dp}{dr} \frac{dp}{dt} + m \frac{d(p[1-\alpha(p)])}{dr} + \\
 & + m^2 g \rho_2 (\rho_2 - \rho_1) V [1-\alpha(p)] - m \frac{dp}{dr} \quad (28) \\
 & - m p \frac{d[1-\alpha(p)]}{dr} - \frac{k_2 I_{12}}{m[1-\alpha(p)]\mu_2} \frac{dp}{dr} = 0.
 \end{aligned}$$

Звільнимось від змінної t , відповідним чином звівши попередні два рівняння в одне,

$$\begin{aligned}
 & m^2 g (\rho_2 - \rho_1) V [\rho_1 \alpha(p) - \rho_2 \alpha(p)] + \\
 & + m \left(\frac{\mu_1}{k_1 p_1} - \frac{\mu_2}{k_2 p_2} \right) \frac{dp}{dr} - \\
 & - \frac{I_{12}}{m} \left(\frac{1}{\alpha(p) \rho_1} + \frac{1}{(1-\alpha(p)) \rho_2} \right) \frac{dp}{dr} \quad (29) \\
 & - m p \left(\frac{\mu_1}{k_1 p_1} - \frac{\mu_2}{k_2 p_2} \right) \frac{d[\alpha(p)]}{dr} - \\
 & - m \left(\frac{\mu_1}{k_1 p_1} + \frac{\mu_2}{k_2 p_2} \right) \frac{d[p\alpha(p)]}{dr} = 0.
 \end{aligned}$$

Отже, ми отримали систему з трьох рівнянь, яка із зазначеними вище допущеннями описує процес фільтрації газоконденсатної суміші. Проведемо її аналіз. Якщо підставити (18) і (19) у (29) можна побачити, що ми отримали рекурентне відносно p рівняння. Саме рівняння є збійним, тобто повинен існувати скінчений розв'язок, але через наявність рекурентності явними методами його розв'язати неможливо, а тому для його практичного застосування обов'язково необхідно використовувати обчислювальну техніку та чисельні методи.

Висновки

В даній роботі отримано систему з трьох рівнянь — одного диференціального, рекурентного та інтегрального. Система описує процес одночасної фільтрації газу та конденсату, що випав, у пористому середовищі. Серед недоліків даної методики можна виділити її складність для практичного застосування через неможливість отримання явного розв'язку. Крім того, вона не враховує теплові ефекти при фазових перетвореннях, зміну компонентного складу газу та конденсату під час зміни тиску. Дана математична модель дає змогу комплексно описати складний процес фільтрації газоконденсатної суміші при ретроградній конденсації і за необхідності може бути реалізована для практичних промислових розрахунків за допомогою чисельних методів.

Література

1. Закиров С.Н. Теория и проектирование разработки газовых и газоконденсатных месторождений: Учеб. пособие для вузов. — М.: Недра, 1989. — 334 с.: ил.
2. Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика: Учебное пособие. — М.: Недра, 1972. — С. 360.
3. Бондарев Э.А., Бабе Г.Д., Гройсман А.Г., Каниболотский М.А. Механика образования гидратов в газовых потоках. — М.: Наука, 1976. — 159 с.
4. Многомерная и многокомпонентная фильтрация: Справочное пособие / С.Н.Закиров, Б.Е.Сомов, В.Я. Гордон и др. — М.: Наука, 1988. — 335 с. ил.

Х Міжнародна науково-технічна конференція

НОВІ СТАЛІ І СПЛАВИ ТА МЕТОДИ ЇХ ОБРОБКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ Й ДОВГО- ВІЧНОСТ ВИРОБІВ

м. Запоріжжя
(20-22 вересня 2005 р.)

Оргкомітет конференції

69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Запорізький національний технічний університет
кафедра фізичного матеріалознавства

Тетяна Павлівна СЕМЕНЮК

Тел.: (0612) 64 21 41; факс: (0612) 69 84 40
E-mail: evi@zstu.edu.ua

Секції конференції:

- *Жароміцні сплави для деталей газових турбін та технології відновлення їх працездатності*
- *Металеві композиційні матеріали*
- *Конструкційні та інструментальні сталі та сплави*
- *Неіржавіючі сталі*
- *Виробництво заготовок деталей із жароміцних та високоміцних сплавів методом литва*

Праці, які становлять науковий інтерес і результати яких цікавлять широке коло фахівців, будуть надруковані в журналі "Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні".