

Н. Р. Батраков, Р. Ш. Абсаямов, Р. Р. Галимзянов, И. Д. Закиев,
А. В. Радаев, А. Н. Сабирзянов, А. А. Мухамадиев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ОБВОДНЕННОГО ПЛАСТА СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА

Ключевые слова: математическое моделирование, сверхкритический флюид, однородный пласт, трехфазная трехкомпонентная фильтрация.

Создана математическая модель трехфазной трехкомпонентной фильтрации системы «сверхкритический флюид-вода-нефть» в диапазоне проницаемостей пласта менее 0,01 Дарси, обводненности пласта более 90 %, вязкости нефти более 60 мПа·с. Модель описывает процесс вытеснения нефти из обводненного пласта сверхкритическим диоксидом углерода с учетом наличия пороговых ограничений, свойственных традиционным методам увеличения нефтеотдачи, что требует применения третичных методов увеличения нефтеотдачи.

Keywords: mathematical modeling, supercritical fluid, homogeneous layer, three-phase three-component filtering.

A mathematical model of a three-phase three-filtering system "supercritical fluid-water-oil" in the range of permeability of less than 0.01 Darcy, drowning more than 90%, the viscosity of oil over 60 mPa·s. The model describes the process of displacement of oil from the reservoir flooded by supercritical carbon dioxide based on the availability of threshold limitations of traditional methods of enhanced oil recovery, which requires tertiary enhanced oil recovery methods.

Введение

Одним из перспективных методов освоения месторождений на поздней стадии разработки является диоксида углерода в сверхкритическом состоянии. Увеличение коэффициента извлечения нефти (КИН) в пластовых условиях объясняется тем обстоятельством, что применение сверхкритического флюида по сравнению с традиционными методами увеличения нефтеотдачи позволяет преодолеть пороговые ограничения [1,2]. В связи с тем, что на КИН влияет большое количество факторов: состав углеводородного сырья, температура, пластовое давление, порометрические свойства пласта-коллектора, режимы нагнетания, физико-механические свойства вытесняющих агентов для выяснения закономерностей их влияния требуется проведение лабораторных исследований на физический моделях нефтяного пласта и математическое моделирование процесса вытеснения нефти с помощью сверхкритических флюидных систем. Были проведены экспериментальные исследования [3] на созданной авторами установке [4]. В настоящей работе описана математическая модель фильтрации многофазных многокомпонентных систем «сверхкритический флюид-вода-углеводород».

Модель

В настоящей работе создана математическая модель процесса фильтрации трехфазной многокомпонентной системы. Схема процесса вытеснения нефти приведена на рис. 1.

Для настоящей модели приняты следующие допущения:

1. Каждая из фаз движется по своим собственным каналам;
2. Относительная фазовая проницаемость не зависит от соотношения вязкостей фаз;

3. Влияние силы тяжести не учитывается;
4. Отсутствует проскальзывание газа по стенкам поровых каналов.

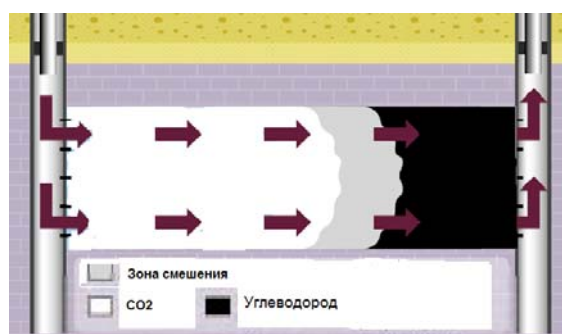


Рис. 1 - Схема процесса вытеснения нефти сверхкритическим диоксидом углерода

Математическая модель состоит из следующих уравнений.

Уравнения неразрывности для нефти запишется в следующей форме:

$$\operatorname{div} \left[\frac{k_{\text{жс}} \rho_{\text{жс}} l_i}{\mu_{\text{жс}}} \cdot \operatorname{grad} p + D_{\text{жс}} \cdot \operatorname{grad} \varphi_{\text{жс}} \right] - \eta_i (\varphi_{\text{жс}} - \varphi_{\text{гс}}) - \frac{\partial}{\partial t} [m \rho_{\text{жс}} s_{\text{жс}} l_i] = 0 \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \left[\frac{k_{\text{гс}} \rho_{\text{гс}} l_i}{\mu_{\text{гс}}} \cdot \operatorname{grad} p + D_{\text{гс}} \cdot \operatorname{grad} \varphi_{\text{гс}} \right] - \eta_i (\varphi_{\text{жс}} - \varphi_{\text{гс}}) - \frac{\partial}{\partial t} [m \rho_{\text{гс}} s_{\text{гс}} l_i] = 0 \quad (2)$$

где η_i - коэффициент массообмена i -м углеводородным компонентом между газовой и жидкой фазой.

$k_{жс}$ - фазовая проницаемость углеводородного компонента; $\rho_{жс}$ - плотность углеводородного компонента; l_i - доля i -го углеводородного компонента в массе жидкости; $\mu_{жс}$ - динамическая вязкость углеводородного компонента; $D_{iжс}$ - эффективные коэффициенты диффузии в жидких фазах; $\varphi_{iжс}$ и $\varphi_{iг}$ - химические потенциалы i -го углеводородного компонента в жидкой и газовой фазах; η_i - коэффициент массообмена для i -го углеводородного компонента; p - абсолютное давление; m - абсолютная пористость пласта, $S_{жс}$ - насыщенность пористой среды жидкой углеводородной фазой; S_g - насыщенность пористой среды газовой углеводородной фазой.

Уравнения неразрывности для сверхкритического флюида:

$$\operatorname{div} \left[\frac{k_{ск} \rho_{ск} r_{ji}}{\mu_{ск}} \cdot \operatorname{grad} p + D_{ic} \cdot \operatorname{grad} \varphi_{ic} \right] - \eta_{ic} (\varphi_{ic} - \varphi_{iжс}) - \frac{\partial}{\partial t} [m \rho_{ск} s_{ск} \cdot r_{ji}] = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \left[\frac{k_{жс} \rho_{жс} r_i}{\mu_{жс}} \cdot \operatorname{grad} p + D_{iжс} \cdot \operatorname{grad} \varphi_{iжс} \right] - \eta_{iжс} (\varphi_{iжс} - \varphi_{iг}) - \frac{\partial}{\partial t} [m \rho_{жс} s_{жс} r_i] = 0 \quad (4),$$

где η_{ic} - коэффициент массообмена сверхкритическим флюидом между сверхкритической и жидкой фазой.

k_c - фазовая проницаемость сверхкритического флюида; ρ_c - плотность сверхкритического флюида; r_i - мольная доля сверхкритического флюида в массе жидкости; $\mu_{ск}$ - динамическая вязкость сверхкритического флюида; $D_{ск}$ - эффективные коэффициенты диффузии в сверхкритической фазе; φ_{ic} и $\varphi_{iжс}$ - химические потенциалы флюида в жидкой и сверхкритической фазах; η_i - коэффициент массообмена для сверхкритического флюида; p - абсолютное давление; m - абсолютная пористость пласта, $S_{жс}, S_{ск}$ - насыщенность пористой среды флюидом в жидком и сверхкритическом состоянии; Уравнения неразрывности для воды запишется в следующей форме:

$$\operatorname{div} \left[\frac{k_e \rho_e}{\mu_e} \cdot \operatorname{grad} p \right] - \eta_e (\varphi_{вжс} - \varphi_{вг}) - \frac{\partial}{\partial t} [m \rho_e s_e] = 0 \quad (5)$$

$$\operatorname{div} \left[\frac{k_e \rho_e \cdot g_e}{\mu_e} \cdot \operatorname{grad} p + D_{вг} \cdot \operatorname{grad} \varphi_{вг} \right] + \eta_e (\varphi_{вжс} - \varphi_{вг}) - \frac{\partial}{\partial t} [m \rho_e s_e \cdot g_e] = 0 \quad (6)$$

где $D_{вг}$ - эффективный коэффициент диффузии водяного пара в газовой смеси; $\varphi_{вжс}, \varphi_{вг}$ - химический потенциал водяного пара в жидкой и газовой фазах; g_e - доля водяного пара в единице массы газа; k_e - фазовая проницаемость воды; ρ_e - плотность воды; $i = 1, 2, \dots, n$

$j = 1, 2, \dots, n$

К приведенному уравнению неразрывности воды необходимо добавить уравнение материального баланса воды, поскольку вода может содержаться в поровом пространстве и адсорбированной скелетом породы. Уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \operatorname{div} U_s = 0 \quad (7)$$

$$W = m \cdot s + w, \quad (8)$$

где W - полное водосодержание единицы объема пористой среды; w - количество адсорбированной воды.

Уравнение энергии запишется в следующей форме:

$$\sum_{\alpha=1}^k m s_{\alpha} v_{\alpha} \rho_{\alpha} C_{p,na} (\operatorname{grad} T + \varepsilon_{ha} \operatorname{grad} p) - \sum_{\alpha=1}^k m s_{\alpha} \rho_{\alpha} l_{p,na} \eta_{sa} \frac{\partial p}{\partial t} - \sum_{\alpha=1}^k \sum_{i=1}^n q_{ia} h_{ia} + \left[\sum_{\alpha=1}^k m s_{\alpha} \rho_{\alpha} C_{p,n} + (1-m) \cdot \rho_c C_{pc} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} \left[\sum_{\alpha=1}^k m s_{\alpha} \lambda_{\alpha} + (1-m) \lambda_c \right] \operatorname{grad} T \quad (9)$$

$$\text{где } \eta_{sa} = \frac{h_{T,na}}{C_{p,na}}, \quad \varepsilon_{ha} = \frac{V_{\alpha}}{l_{p,na}}$$

$C_{p,na}$ - удельная теплоемкость при постоянных давлении и составе;

$h_{T,na}$ - скрытая удельная теплота изменения давления при постоянных составе и температуре.

Величина теплового эффекта фазовых превращений:

$\sum_{\alpha=1}^k \sum_{i=1}^n q_{ia} h_{ia}$
 $\rho_{\alpha}, C_{p,c}, \lambda_c$ - плотность, теплоемкость, теплопроводность твердого тела соответственно;

λ_{α} - коэффициент теплопроводности каждой из фаз;

S_{α} - насыщенность пористой среды каждой из фаз;

m - абсолютная пористость пласта;

$v_{\alpha} = \frac{k_{\alpha}}{\mu_{\alpha}} \operatorname{grad} p$ - скорость фильтрации фаз в пористой среде, определяемая по закону Дарси.

Оба уравнения решаются методом конечных элементов.

В общем случае скорость фильтрации каждой фазы в отдельности подчиняется следующему степенному закону [3]:

$$|g| = Ak^{\frac{3\chi-1}{2}} \cdot \mu^{1-2\chi} \cdot \rho^{\chi-1} \cdot |\nabla p|^{\chi}, \quad (10)$$

где $A = (\text{Re}_{кр}^2 \cdot Sl)^{\frac{1-\chi}{2}} \cdot g^{1-\chi}$, явный вид которого необходимо определить в случае нелинейного закона фильтрации;
 g - ускорение свободного падения;

$$\text{Re} = \frac{V \cdot \rho_{жс} \cdot d_{экв}}{\mu_{жс}} \quad (11)$$

$$Sl = \frac{V \cdot \mu_{жс} \cdot L}{d_{экв}^2 \cdot P}, \quad (12)$$

где V - скорость фильтрации; L - длина пласта;

P - давление нагнетания; $\frac{1}{d_{экв}} = \sum \frac{r_i}{d_i}$ -

эквивалентный диаметр частиц.

r_i - объемная доля частиц песка соответствующего диаметра.

d_i - средний диаметр частиц песка, м;

ρ_n - плотность нефти;

μ_n - вязкость нефти;

Соотношения $\varphi_{iz} = \varphi_{im} \varphi_{iz} = \varphi_{iжс} \sum_{\alpha=1}^k l_{i\alpha} = 1$;

$\sum_{\alpha=1}^k s_{\alpha} = 1 \quad \alpha, \nu = 1, 2 \dots k$ замыкают систему

дифференциальных уравнений.

Система уравнений неразрывности и движения дополняется уравнением Пенга-Робинсона [5]:

$$P = \frac{R \cdot T}{V_{см} - b_{см}} - \frac{a_{см}}{V_{см}(V_{см} + b_{см}) + b_{см}(V_{см} - b_{см})} \quad (13)$$

где $a_{см}$ и $b_{см}$ - коэффициенты, определяемые следующим образом:

$$a_{см} = \sum_i^n \sum_j^n y_i y_j \cdot a_{ij};$$

$$b_{см} = \sum_i^n \sum_j^n y_i y_j \cdot b_{ij};$$

$$a_{ij} = (1 - k_{ij}) \cdot \sqrt{a_i \cdot a_j};$$

$$a_i = \frac{0,45724 R^2 \cdot T_{кр}^2}{P_{кр}};$$

$$b_i = \frac{0,0778 R \cdot T_{кр}}{P_{кр}}$$

где y_i, y_j - мольные доли компонентов в смеси;

P_c и T_c - критические давления и температура смеси; ω - фактор ацентричности i -го компонента.

Литература

1. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов / М.Л. Сургучев.- М.: Недра, 1985.- 313 с;
2. Бурже Ж. Термические методы нефтеотдачи пластов / Ж. Бурже и др. М: Недра, 1988.- 421 с;
3. Кондратьев И.А., Батраков Н.Р., Радаев А.В., Сабирзянов А.Н., Мухамадиев А.А., Галимзянов Р.Р. Экспериментальная установка для исследования процесса водогазового воздействия при вытеснении вязких нефтей / Вестник Казанского технологического университета.-№ 6.-С. 199-201;
4. Радаев А.В. Экспериментальная установка для исследования процесса вытеснения нефти при термобарических условиях реальных пластов с использованием сверхкритических флюидных систем / А.В. Радаев, Н.Р. Батраков, А.А. Мухамадиев, А.Н. Сабирзянов / Вестник Казанского технологического университета, 2009.-№ 3.- С. 96-102
5. Уейлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х частях.- Ч. 2.-М: «Мир», 1989.- 360 С.

© **Н. Р. Батраков** - вед. инж. каф. теоретических основ теплотехники КНИТУ, Nuris.batrakov@gmail.com; **Р. Ш. Абсалямов** - зав. сектором отдела, РНМ Татарский научно исследовательский и проектный институт; **Р. Р. Галимзянов** – студ. КНИТУ; **И. Д. Закеев** - студ. КНИТУ; **А. В. Радаев** - к.т.н. доц. каф. теоретических основ теплотехники КНИТУ, radaev_neftianik@mail.ru; **А. Н. Сабирзянов** - д.т.н., проф. той же кафедры, sabirz@kstu.ru; **А. А. Мухамадиев** - к.т.н. доц. той же кафедры, mukhamadiev_a@mail.ru.