

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПЛАСТЕ ПРИ РАЗГАЗИРОВАНИИ НЕФТИ**

**Аннотация.** В статье рассматривается численное решение системы дифференциальных уравнений, которая описывает нестационарное движение газированной нефти, методом конечных разностей. Проводится моделирование двухфазной фильтрации в пласте и исследование основных особенностей температурного поля в пласте в условиях разгазирования нефти.

**Ключевые слова:** подземная гидромеханика, теория фильтрации, теплофизика, разгазирование нефти, пласт, двухфазная фильтрация, модель black oil, термометрия.

**Введение.** В условиях очень низких объемов добычи, а также ухудшения качества состава добываемого углеводородного сырья методы геофизического контроля приобретают все более важное значение, в частности, при разработке многопластовых систем [1;8-10]. Термометрия остается одной из самых эффективных методов геофизического исследования. Это подтверждается тем, что температура, характеризующая энергетическое состояние системы, чувствительна к изменению процессов, протекающих в скважине и пласте. Таким образом, термометрия часто применяется при исследовании и решении нефтепромысловых задач. На данный момент термометрия используется только на качественном уровне, а для количественной обработки термограмм необходимо брать во внимание ряд термогидродинамических процессов. Именно из-за этого актуален вопрос разработки математической модели, которая позволит оценить влияние того или иного фактора и эффекта на формирование теплового поля.

### **Постановка задачи**

Математическая модель фильтрации нефти и газа в пласте рассматривается при некоторых допущениях: пренебрегается влиянием капиллярного давления и

температуры на параметры флюидов и пласта, пренебрегается влиянием силы тяжести, не учитывается изменение вязкости от температуры и давления, процессы равновесные термодинамические коэффициенты постоянны (коэффициент объемного расширения), однотемпературная модель. Основной является модель black oil [1;8-10]. Примем обозначения фаз: 1-нефть, 2-газ, для компонент: 1- нефтяная, 2-газовая. Растворение идет по закону Генри. Пусть температуры каждой фаз и скелета одинаковы для всего пласта. Процесс разгазирования мгновенный [1;10]. С учетом вышеперечисленных допущений уравнения двухфазной неизоэнтальпической фильтрации с учетом разгазирования нефти в пористой среде выглядят следующим образом:

Уравнение сохранения массы нефти :

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 S_1 (1 - g)) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho_1 (1 - g) \frac{k_1(S_1)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial r} \right), \quad (1)$$

уравнение сохранения массы смеси:

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \left( \rho_1 \frac{k_1(S_1)}{\mu_1} + r \rho_2 \frac{k_2(S_2)}{\mu_2} \right) \frac{\partial P}{\partial r} \right), \quad (2)$$

которые получаются из уравнений сохранения массы [2;255-257] для каждой  $i$ -й фазы как уравнение неразрывности для однофазного течения:

$$\frac{\partial}{\partial x} (m \rho_i^o S_i) + \text{div}(\rho_i^o \bar{w}_i) = 0, \quad (3)$$

$$\bar{w}_i = -\frac{K}{\mu_i} k_i(S) (\text{grad} P_i - \rho_i^o \bar{g}). \quad (4)$$

Одно из слагаемых во втором уравнении обращается в ноль, т.к. мы пренебрегаем влиянием силы тяжести.

Скорость фильтрации флюида подчиняется закону Дарси в пористой среде:

$$v_i = -\frac{K}{\mu_1} k_i(S_i) \frac{\partial P}{\partial r}. \quad (5)$$

Уравнение энергии для описания фильтрации газированной нефти в пласте с учетом конвективного переноса тепла, радиальной теплопроводности, эффекта Джоуля –Томсона, адиабатического, теплоты разгазирования можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (m(\rho_1 c_1 S_1 + \rho_2 c_2 S_2)T + (1-m)\rho_r c_r T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(\rho_1 c_1 v_1 + \rho_2 c_2 v_2)T) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda^* \frac{\partial T}{\partial r} \right) + J_{12}(c_2 - c_1)T + J_{12}L_{12} + m(\rho_1 c_1 S_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 S_2 \eta_2) \frac{\partial P}{\partial t} - \\ (\varepsilon_1 \rho_1 c_1 v_1 + \varepsilon_2 \rho_2 c_2 v_2) \frac{\partial P}{\partial r} \end{aligned} \quad (6)$$

В этом уравнении интенсивность переноса массы из нефтяной фазы в газовую (при разгазировании нефти) [1;11] описывается соотношением:

$$J_{12} = m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 S_1 g) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho_1 g \frac{k_1(S_1)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial r} \right). \quad (7)$$

Вышеприведенное уравнение энергии получается из закона сохранения энергии:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad (8)$$

и закона Фурье:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (9)$$

где  $t$  – время,  $m$  – пористость,  $c_i$  – удельные теплоемкости фаз,  $\rho_i$  – плотность,  $S_i$  – насыщенность,  $\mu_1$  – вязкость,  $g$  – концентрация газа в нефтяной фазе,  $r$  – координата в пласте по радиусу,  $r$  – координата в пласте по радиусу,  $v_i$  – скорость фильтрации,  $K$  – абсолютная проницаемость,  $k_i$  – фазовые проницаемости,  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $\lambda^*$  – теплопроводность насыщенной горной породы,  $J_{12}$  – интенсивность переноса массы при разгазировании,  $L_{12}$  – теплота фазового перехода,  $\eta_i$  – адиабатический коэффициент,  $\varepsilon_i$  – коэффициент Джоуля-Томсона.

**Исследование температурного поля в пластовой системе.** Исследование проводится на модельном пласте со следующими характеристиками:

Пористость  $m=0.2$ , абсолютная проницаемость  $K=4.6 * 10^{-12} \text{ м}^2$ , пластовое давление -260 атм, забойное давление-70 атм, температура пластовая –  $84^{\circ}\text{C}$ , плотность нефти при нормальных условиях  $=800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , насыщенность не  $S_1=1$ , давление насыщения нефти 99 атм, удельная теплоемкость нефти –  $2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ , удельная теплоемкость газа –  $2365 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ , адиабатический коэффициент нефти –  $1.4532 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , адиабатический коэффициент газа –  $1.314 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , коэффициенты

Джоуля-Томсона— $0.4 \cdot 10^{-6}$ , 0.1508, динамическая вязкость -  $5 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ ,  $10.39 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ ; плотность атмосферная -  $0.7168 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , давление атмосферное - 1 атм, удельная теплоемкость породы -  $750 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ , теплопроводность насыщенной горной породы -  $2.1 \frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}}$ , объемный расход нефти  $5.787045.7 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ , объемный расход газа  $-1,45 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ .

С учетом перечисленных допущений и входных данных замкнутая система уравнений двухфазной неизотермической фильтрации в пористой среде имеет вид:

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 S_1 (1 - g)) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_1 (1 - g) \frac{k_1(S_1)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial r}), \text{ при } P > P_{nas}$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r (\rho_1 \frac{k_1(S_1)}{\mu_1} + r \rho_2 \frac{k_2(S_2)}{\mu_2}) \frac{\partial P}{\partial r}), \text{ при } P \leq P_{nas}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (m(\rho_1 c_1 S_1 + \rho_2 c_2 S_2) T + (1 - m) \rho_r c_r T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(\rho_1 c_1 v_1 + \rho_2 c_2 v_2) T)$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda^* \frac{\partial T}{\partial r} \right) + J_{12} (c_2 - c_1) T + J_{12} L_{12}$$

$$+ m(\rho_1 c_1 S_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 S_2 \eta_2) \frac{\partial P}{\partial t} - (\varepsilon_1 \rho_1 c_1 v_1 + \varepsilon_2 \rho_2 c_2 v_2) \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$\rho_1 = \rho_1^0 * \exp(\beta_1 (P - P_{zab})) \quad (10)$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_{atm}}{P_{atm}} P \quad (11)$$

Фазовые проницаемости находятся по формуле Викофу-Ботсета:

$$k_1(S_1) = 1.06 * S_1^2 - 0.06 \quad (12)$$

$$k_2(S_2) = 1.16 * S_2 \quad (13)$$

Начальные и граничные условия задавались следующим образом:

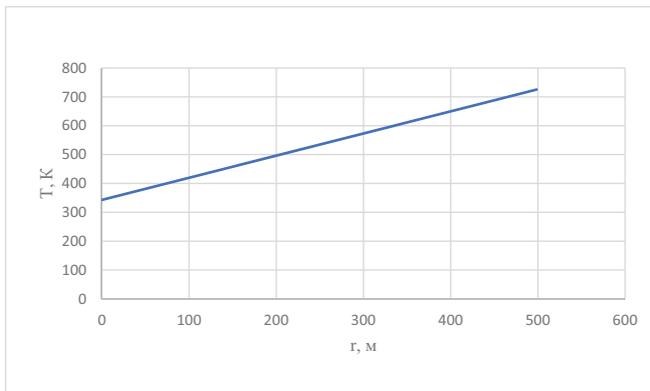
$$P(r, 0) = P_{pl}$$

$$P(0, t) = P_{zab} \quad (14)$$

$$P(R_k, t) = P_{pl}$$

Предложенная система уравнений решается с помощью явной правой конечной разностной схемы.

С приближением к призабойной зоне температура монотонно убывает (Рис. 1). Такое явление описывает процесс разгазирования нефти. При уменьшении температуры изменяются характеристики продукта, как вязкость (в данном случае, она увеличивается), объем содержания газа и нефти и вмещающей породы. Рассматриваемый процесс осложнит добычу углеводородов и приведет к потерям ценных продуктов. Таким образом, полученный результат по изменению температурного поля в пласте при разгазировании нефти, показывает, что с уменьшением температуры со временем по радиусу влечет за собой образование сильно вязкой нефти и слабо вязкого газа. Поэтому при разработке нефтяных месторождений необходимо увеличивать пластовую температуру.



*Рис. 1* Изменение температуры по латерали пласта.

## **Заключение**

Предложена математическая модель неизотермической двухфазной фильтрации газированной нефти в пласте;

В процессе параметрического исследования предложенной модели установлено, что эффект Джоуля-Томсона проявляется в призабойной зоне пласта при существенных градиентах давления;

Эффект разгазирования нефти проявляется по всему объему пласта и оказывает наибольшее влияние на температурный режим.

Авторы выражают благодарность научному руководителю Н.Е. Актаеву за внимание к работе.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шарафутдинов Р.Ф. Численное исследование температурного поля в системе «скважина - пласт» при разгазировании нефти/ Шарафутдинов Р.Ф., Канафин И.В., Хабиров Т.Р., Низаева И.Г.// Вестник Тюменского государственного университета.
2. Басниев К.С., Кочина Н.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика: Учебник для вузов.-М.:Недра,1993.
3. Валлиулин Р.А. Исследование радиально-углового распределения температуры при неизотермической двухфазной фильтрации нефти и газа / Р.А.Валлиулин, Р.Ф.Шарафутдинов и др. // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Том 49. №6. С. 124-130.
4. Валлиулин Р.А. Термические исследования при компрессорном освоении скважин / Р.А.Валлиулин, А.Ш. Рамазанов. Уфа:Изд-во Башкир.ун-та,1992.
5. Валлиулин Р.А. Термометрия многофазных потоков / Р.А. Валлиулин, А.Ш.Шамазанов, Р.Ф.Шарафутдинов. Уфа:Изд-во Башкир.ун-та,1995.