

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТАХ

А.А. Зайцев

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Характерная особенность современного и будущего развития мировой нефтедобычи является включение в разработку месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, к которым относятся, в основном, тяжелые и высоковязкие нефти. Запасы такой нефти в значительной степени превышают запасы остаточной извлекаемой нефти примерно в 5 раз и, по оценкам специалистов, составляют не менее 1 трлн. т. В странах с развитой промышленностью высоковязкая нефть рассматривается в качестве основной источника добычи на ближайшие годы. Отмечается, что за пределами вязкости нефти в 30 Па·с появляются осложнения в ее добыче, что приводит к большой себестоимости и низкой нефтеотдаче. Усовершенствование и модернизация современного аппарата увеличения нефтеотдачи позволит частично или полностью решить эту проблему.

На сегодняшний день среди таких методов по увеличению добычи высоковязкой нефти выделяется закачка теплоносителя в пласт. Но у этого метода есть свои минусы – постоянная закачка теплоносителя в высокопроводящий водяной пласт приводит к значительным затратам. Предлагается осуществление периодической закачки теплоносителя. Тогда за счет существенной разницы в темпах конвективного разогрева пласта и его остывания через кровлю и подошву удастся заметно уменьшить тепловые затраты при сохранении высоких коэффициентов извлечения нефти из пластов. Подтверждение вышеописанных эффектов и разработку методов их оптимизации и борьбы с нежелательными последствиями целесообразно проводить на основе математического моделирования.

При моделировании процессов неизоэтермической фильтрации, как правило, предполагается мгновенное выравнивание температуры между жидкостью и скелетом пласта. Обоснование этого предположения можно найти, например, в работе [7]. В данной статье использованы численные преобразования и результаты, полученные авторами [1] модели, позволяющей определить поля температуры, давления и нефтенасыщенности в многослойной залежи, а также интегральные показатели разработки пласта: КИН по пропласткам и пласту в целом, текущий дебит скважин и ряд других.

Схематизируем залежь следующим образом. Будем рассматривать плоскопараллельные однородные пропластки, разделенные между собой перемычками (которые могут и отсутствовать). Перемычки между пропластками будем считать теплопроводящими и гидродинамически непроницаемыми. Схема многослойной залежи представлена на рисунке 1.

Пусть пласт состоит из двух параллельных пропластков, разделенных между собой непроницаемой теплопроводящей перемычкой. Пласт вскрыт системой нагнетательных и эксплуатационных скважин, расположенных параллельно друг другу (система двух галерей). Систему координат выберем так, что ось  $x$  направлена по течению жидкости, ось  $z$  – вертикально вверх и  $y$  – перпендикулярно плоскости  $xOz$ . Плоскость  $yOz$ : совместим с плоскостью нагнетательной галереи. Очевидно, что в силу выбранного расположения скважин, процесс можно рассматривать в плоскости  $xOz$  (рисунк 2).



Рис. 1. Схема задачи многослойной неизоэтермической фильтрации

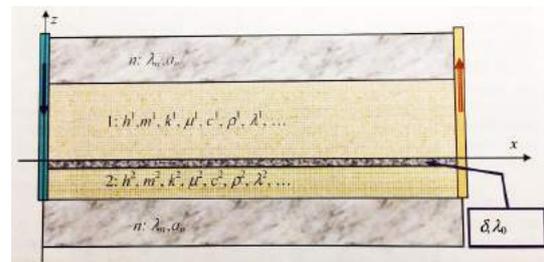


Рис. 2. Параметры системы для задачи плоскопараллельной фильтрации

Следуя работе [11], уравнения, описывающие неизоэтермическую фильтрацию в описанной выше области, могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \rho_{v,i} v_{v,i} + \frac{\partial}{\partial t} m_i s_i \rho_{v,i} &= 0, & \frac{\partial}{\partial x} \rho_{n,i} v_{n,i} + \frac{\partial}{\partial t} m_i (1-s_i) \rho_{n,i} &= 0, & v_{v,n,i} &= \frac{k_i k_{v,n,i}}{\mu_{v,n}} \frac{\partial p_i}{\partial x}, \\ \rho_{v,n,i} &= \rho_{v,n,i}(p_{v,n,i}, T_{v,n,i}), & m_i &= m_i(p_i, T_i), \\ \frac{\partial}{\partial z} \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} - (c_{n,i} \rho_{n,i} v_{n,i} + c_{v,i} \rho_{v,i} v_{v,i}) T \right] - \frac{\partial}{\partial t} (c_i T_i) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i=1,2$ ,  $m_i$  – пористость  $i$ -того пропластка,  $s_i$  – водонасыщенность  $i$ -того пропластка,  $v_{\theta,n,i}$  – скорость фильтрации  $i$ -того пропластка,  $\lambda_{\theta,n,c,i}$  – теплопроводность нефти, воды и скелета в  $i$ -том пропластке,  $c_{\theta,n,c,i}$  – удельная теплоемкость и плотность нефти, воды и скелета породы в  $i$ -том пропластке,  $\mu_{\theta,n}$  – вязкость воды и нефти,  $k_i$  – абсолютная проницаемость  $i$ -того пропластка,  $k_{\theta,n,i}$  – относительные фазовые проницаемости воды и нефти в  $i$ -том пропластке,  $T_i$  – температура в  $i$ -том пропластке,  $p_i$  – давление в  $i$ -том пропластке,  $h_1, h_2$  – толщины пропластков,  $\delta$  – толщина перемычки, индекс  $i=1$  относится к верхнему пропластку, а  $i=2$  – к нижнему.

При записи уравнений (1) пренебрегаются капиллярные силы, так как они оказывают воздействие только в окрестностях фронта вытеснения, и предполагается равенство температур скелета пласта и насыщающей его жидкости. В дальнейшем предполагаем, что

$$c_{\theta,1} = c_{\theta,2} = c_{\theta}, \quad c_{n,1} = c_{n,2} = c_n, \quad c_{c,1} = c_{c,2} = c_c, \quad \lambda_{\theta,1} = \lambda_{\theta,2} = \lambda_{\theta} = const, \quad \lambda_{n,1} = \lambda_{n,2} = \lambda_n = const, \\ \lambda_{c,1} = \lambda_{c,2} = \lambda_c = const, \quad \rho_{\theta,1} = \rho_{\theta,2} = \rho_{\theta} = const, \quad \rho_{n,1} = \rho_{n,2} = \rho_n = const.$$

К системе уравнений (1) необходимо добавить уравнения переноса тепла в подошве и кровле, то есть в окружающих пропластки породах:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial z} \right) = c_n \rho_n \frac{\partial T_n}{\partial t}.$$

После ряда численных преобразований, согласно [1] имеем систему уравнений для определения полей давления  $p$ , водонасыщенности  $s_i$  и средней температуры  $\langle T_i \rangle$  в каждом  $i$ -том пропластке ( $1 \leq i \leq N$ )

$$m_i \frac{\partial s_i}{\partial t} + u_i(t) \frac{\partial F(s_i)}{\partial x} = 0, \quad v_{n,i} = (1 - F(s_i)) u_i(t), \quad v_{\theta,i} = F(s_i) u_i(t), \quad u_i(t) = \frac{(p_n - p_{\theta})}{\int_0^L \frac{\mu_{\theta} F(s_i)}{k_i k_{\theta,i}(s_i)} dx}, \\ p_i(x) = p_{\theta} + u_i(t) \cdot \int_x^L \frac{\mu_{\theta} F(s_i)}{k_i k_{\theta,i}(s_i)} dx, \quad F(s_i) = \frac{k_{\theta,i}}{k_{\theta,i} + \mu_0 k_{n,i}}, \quad \mu_0 = \frac{\mu_{\theta}}{\mu_n}, \\ \frac{\partial c_i \langle T_i \rangle}{\partial t} = Q_{T,i} + \Lambda_{i-1/2} (\langle T_i \rangle - \langle T_{i-1} \rangle) + \Lambda_{i+1/2} (\langle T_i \rangle - \langle T_{i+1} \rangle) - \frac{\partial}{\partial x} \left[ (c_n \rho_n v_{n,i} + c_{\theta} \rho_{\theta} v_{\theta,i}) \langle T_i \rangle \right], \\ c_i = m_i (s_i \rho_{\theta} c_{\theta} + (1 - s_i) \rho_n c_n) + (1 - m_i) \rho_c c_c, \quad \lambda_i = m_i (s_i \lambda_{\theta} + (1 - s_i) \lambda_n) + (1 - m_i) \lambda_c,$$

где  $\Lambda_{i \pm 1/2}$  – осредненный коэффициент теплопроводности между  $i$ -тым и  $(i \pm 1)$ -ым пропластком; при  $i = 1$  и  $i = N$  соответствующие члены в уравнении отсутствуют.

Для описания теплоотдачи в кровлю и подошву пользуемся аналитической зависимостью:

$$Q_{T,КР,ПД} = \frac{\varphi(F_0) 2 \lambda_{КР,ПД}}{h^2} (T_0 - \langle T_{1,N} \rangle),$$

где  $Q_{Т,ПД}$ ,  $Q_{Т,КР}$  – теплоотдача в подошву и кровлю пласта.

Используя данную модель двухфазного течения, авторы [1] смоделировали сценарии закачки агента теплоносителя в пласт и на их основе получены следующие выводы.

Для оптимизации энергозатрат разработку рекомендуется проводить путем поочередной (импульсной) закачки горячего и холодного теплоносителей с продолжительностью одного импульса 500 суток. При возможности блокирования высокопроницаемых областей на скважине в момент закачки холодного вытесняющего агента эти слои необходимо закрывать. Также, за счет существенной разницы в темпах конвективного разогрева пласта и его кондуктивного остывания через кровлю и подошву удастся уменьшить эти тепловые затраты при сохранении высоких коэффициентов извлечения из пластов нефти.

Все параметры теплового воздействия на пласт крайне желательно подбирать с использованием геотепловой модели и построенной на ее основе компьютерной модели для каждого месторождения индивидуально.

### Литература

1. Байбаков Н.К., Гарушев А.Р. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1981.
2. Липаев А.А., Шевченко Д.В., Чугунов В.А., Бурханов Р.Н. Геотепловое моделирование многослойных нефтяных пластов. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 236 с.
3. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1965. – 238 с.