

уравнения Дарси. Дебит жидкости в скважину с учетом зонального изменения температуры и вязкости нефти в рамках данной модели будет определяться выражением:

$$Q = \frac{\pi k (p_c - p_w) \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_c}\right)^2}}{\mu \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_*}\right) + \mu_T \left(\frac{1}{r_*} - \frac{1}{r_w}\right)} \quad (4)$$

где μ_T , μ – вязкость нефти при температуре пара T_s и при пластовой температуре, p_c – давление на контуре питания, p_w – давление на забое скважины, k – проницаемость. Это выражение учитывает, что нагретая нефть находится в конусообразной зоне от скважины до координаты r_* , непрогретая – в остальной области фильтрации до радиуса контура питания r_c .

Предложена физико-математическая модель пароциклической обработки с параллельным наклонным смещением фронта прогрева с учетом размеров прогретой зоны. Предложенная методика предоставляет возможность более точным образом предсказать технологические параметры разработки месторождения. Это позволит выбрать более рациональный режим разработки пласта и, следовательно, увеличить коэффициент извлечения нефти.

Зависимость дебита от времени при определенных модельных параметрах будет иметь вид (рис.1), в случае если для моделирования взяты следующие параметры; $\mu = 0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\mu_T = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $r_c = 900 \text{ м}$, $r_w = 0,1 \text{ м}$, $Q_s = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$, $\rho_s = 40 \text{ кг/м}^3$, $c_s = 4400 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $l = 2300000 \text{ Дж/кг}$, $T_0 = 350 \text{ К}$, $T_s = 450 \text{ К}$, $\alpha = 0,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $m = 0,3$, $h = 20 \text{ м}$, $p_c = 200 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $p_w = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $\rho_r = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\rho_o = 800 \text{ кг/м}^3$ – плотности породы и нефти; $c_r = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $c_o = 4500 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ – теплоемкость породы и нефти.

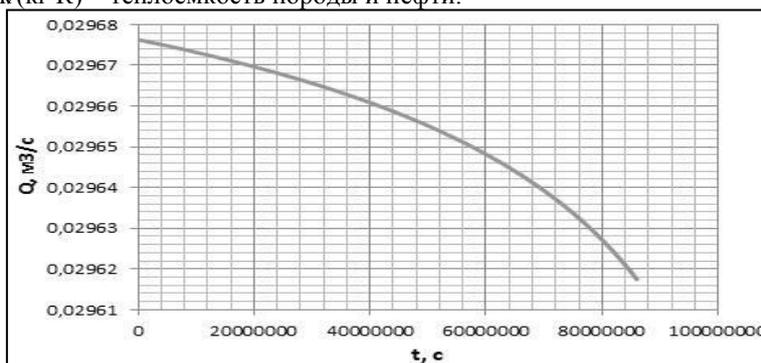


рис.1. Зависимость дебита от времени для разработанной модели

Моделирование древовидных структур на поверхности воды с помощью пакета ANSYS

Русова Дарья Александровна

Мартюшев Леонид Михайлович, Звонарев Константин Валерьевич

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Мартюшев Леонид Михайлович, д.ф.-м.н.

dariarusova@mail.ru

Ранее в работе [1] было обнаружено на поверхности воды распределение температуры древовидной (фрактальной) формы. Условия эксперимента были следующие. Вода, нагретая до температур 30-40°C, находилась в круглой стеклянной емкости (диаметром 100 мм). Глубина жидкости была 5-10 мм. Жидкость граничила с воздухом, находящимся при комнатной температуре. Наблюдение поверхности жидкости велось в тепловизор Infratec ImageIR. Древовидные ветви структур имели температуру примерно на 3 °C меньшую, чем окружающая жидкость. Природа этих структур до конца не понятна, с этой целью было предпринято их математическое моделирование.

Численное моделирование задачи выполнялось в пакете ANSYS FLUENT. Конвективное движение несжимаемой жидкости описывалось системой уравнений движения механики сплошных сред:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla(\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho \vec{U} h) = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, \vec{U} – скорость движения жидкости, p – давление, $\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{U} I \right]$ – тензор вязких напряжений, μ – коэффициент динамической вязкости, I – единичный тензор, \vec{g} – ускорение свободного паления, $h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT$ – энтальпия, $T_{ref} = 298.15 \text{K}$, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, T – температура жидкости, λ – коэффициент теплопроводности жидкости. Зависимость плотности от температуры учитывалась в приближении Буссинеска $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$, где ρ_0 – равновесная плотность при температуре T_0 , β – коэффициент объемного расширения жидкости.

Использовались следующие граничные условия. На дне и боковых стенках слоя задается условие полного прилипания жидкости $\vec{U} = 0$, а температура жидкости считается равной температуре стенок $T = T_w$. Расчеты проводились при однородной температуре $T_w = 40^\circ\text{C}$. На верхней границе слоя $z = d$ (свободная поверхность) задается условие не протекания (равенство нулю нормальной компоненты скорости) и сдвиговое напряжение (Shear Stress):

$$\tau_w \equiv \tau(d) = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=d} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \nabla_S T, \quad (4)$$

здесь σ – поверхностное натяжение жидкости, $\nabla_S T$ – температурный градиент на свободной поверхности. Для градиента поверхностного натяжения использовалось известное экспериментальное значение для воды $d\sigma/dT = -0.00015 [\text{N m}^{-1} \text{K}^{-1}]$.

Температура свободной поверхности не известна заранее и должна определяться в процессе расчета. Поэтому вместо этой температуры задается плотность теплового потока, слагающегося из конвективного и испарительного отвода тепла:

$$q = H(T_\infty - T_S) + L\dot{m}, \quad (5)$$

где $T_\infty = 25^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды, T_S – температура поверхности жидкости, $H = 4.3 [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$ – коэффициент теплоотдачи для горизонтальной поверхности, обращенной вверх, $L = 2263 \cdot 10^3 [\text{J kg}^{-1}]$ скрытая теплота парообразования воды, \dot{m} – скорость испарения жидкости, выражение для которой бралось на основе [2].

Расчетная область представляет из себя цилиндрический слой воды толщиной 1 см и диаметром 10 см. Одна из полученных структур расчета представлена на рис.1. Важным результатом расчета стало обнаружение того, что при пренебрежении поверхностным натяжением (сдвиговое напряжение равно нулю) древовидные структуры исчезали.

В дальнейшем построенную модель предполагается использовать для анализа причин возникновения других наблюдаемых структур, возникающих при изменении глубины жидкости [1].

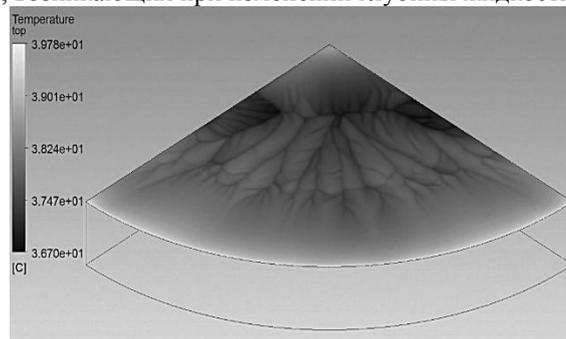


рис.1. Древовидная структура на поверхности, полученная в результате расчета. Число ячеек расчетной сетки $3 \cdot 10^6$.

Список публикаций:

- [1] Rusova D. A., Martyushev L. M. // AIP Conf. Proc. 2174, 020162, 2019.
 [2] Хащенко А.А., Вечер О.В., Дискаева Е.И. // Известия АГИ, 2016, № 89(1), С.84.