

## Численное моделирование процессов многофазной фильтрации при химической реакции окисления с образованием газовой фазы

Р. Р. Салихов, Н. А. Завьялова, И. Н. Завьялов, А. В. Конюхов

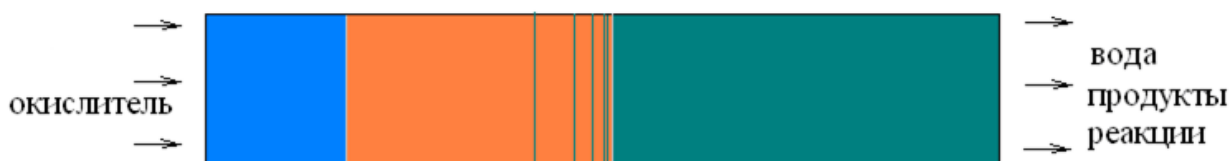
Московский физико-технический институт (государственный университет)

В мире существуют огромные запасы трудноизвлекаемой нефти, в связи с этим возникает необходимость создания новых методов исследования нефтяных месторождений. Для интенсификации добычи трудноизвлекаемых углеводородов необходимо увеличивать подвижность извлекаемых запасов. Это достигается за счет увеличения внутрискластовой температуры. Одним из перспективных методов разогрева пласта является организация внутрискластового горения, которое происходит за счет нагнетания в пласт окислителя. Однако в настоящее время остаются не достаточно хорошо изученными вопросы, связанные с процессами фильтрации при образовании новой газовой фазы. При закачке в пласт окислителя практически невозможно контролировать фронт горения. Таким образом, одним из наиболее важных вопросов является поиск условий устойчивости распространения фронта окисления, что определяет актуальность изучения процесса развития неустойчивости фронта реакции и поиск способов ее подавления.

Целью работы является изучение особенностей процессов фильтрации, происходящих при наличии химических реакций с образованием газовой фазы между вытесняющей жидкостью и твердым скелетом.

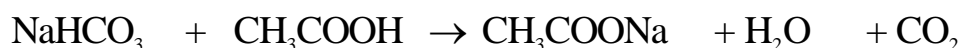
### Постановка задачи

В модели считается, что поровое пространство заполнено водой и маслом. Пористая среда содержит восстановитель, молярная плотность которого составляет  $m_0$ . Через левую границу поступает раствор окислителя с молярной концентрацией  $c$ . При контакте окислителя с восстановителем происходит реакция с образованием воды и газа. Схематическая картина данного процесса представлена на рис. 1.



**Рис.1. Общая схема процесса фильтрации.**

Примером реакции окислителя с восстановителем, при которой образуется вода и газ, может быть реакция уксусной кислоты с пищевой содой:



Скорость реакции считается пропорциональной произведению молярных концентраций реагентов, коэффициент пропорциональности - обратное характерное время реакции  $\tau^{-1}$ .

Для упрощения модели многофазной фильтрации при выводе уравнений пренебрегается следующими эффектами:

- тепловым эффектом реакции;
- сжимаемостью газовой и жидкой фазы (так как вытесняемая и вытесняющая фазы — слабосжимаемые упругие жидкости, то влиянием сжимаемости на распределение насыщенности можно пренебречь, поскольку время перераспределения давления за счет сжимаемости жидкостей приблизительно на два порядка меньше, чем время вытеснения);
- зависимостью плотности и вязкости раствора от концентрации;
- изменением пористости и абсолютной проницаемости ( $k_0 = const, \varphi = const$ ).

#### Математическая модель

При рассмотрении многофазной фильтрации получаем следующие уравнения сохранения массы (уравнения неразрывности):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t}(\phi S \rho_{sol}) + \frac{\partial}{\partial x}(W_1 \rho_{sol}) = -\zeta_{R_1} r + \zeta_{H_2O} r \\ \frac{\partial}{\partial t}(\phi S \rho_{sol} c) + \frac{\partial}{\partial x}(W_1 \rho_{sol} c) = -\zeta_{R_1} r \\ \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_{gas} (1 - S - S_m)) + \frac{\partial}{\partial x}(W_2 \rho_{gas}) = \zeta_{CO_2} r \\ \frac{\partial}{\partial t}(\phi S_m \rho_m) + \frac{\partial}{\partial x}(W_m \rho_m) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} m = -\zeta_{R_2} r \end{array} \right. \quad (1)$$

При этом использовали следующие обозначения:  $\phi$  - пористость среды,  $S$ ,  $S_m$  - насыщенность воды и масла,  $\rho_{sol}$ ,  $\rho_{gas}$ ,  $\rho_m$  - плотность раствора кислоты, образовавшегося газа и масла соответственно,  $c$  - концентрация уксусной кислоты в растворе,  $\zeta_{R_1}$ ,  $\zeta_{H_2O}$ ,  $\zeta_{CO_2}$ ,  $\zeta_{R_2}$  - стехиометрические коэффициенты,  $r$  - скорость химической реакции,  $m$  - молярная масса восстановителя,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_m$  - вектор фильтрации в окислителе, газе и масле соответственно.

В системе (1) уравнения отвечают за изменение массы воды, окислителя, газа, масла и восстановителя соответственно.

Скорость химической реакции определяется из следующего уравнения:

$$r = \frac{1}{\tau} mSc, \quad (2)$$

где  $\tau$  - время химической реакции.

Выразим зависимость между вектором фильтрации и градиентом давления в каждой фазе. Для этого воспользуемся законом Дарси:

$$W_1 = -k_0 \frac{S^2}{\mu_{sol}} \frac{\partial}{\partial x} p \quad (3)$$

$$W_2 = -k_0 \frac{(1-S-S_m)^2}{\mu_{gas}} \frac{\partial}{\partial x} p \quad (4)$$

$$W_m = -k_0 \frac{S_m^2}{\mu_m} \frac{\partial}{\partial x} p \quad (5)$$

Использованы следующие условные обозначения:  $\mu_{sol}$ ,  $\mu_{gas}$ ,  $\mu_m$  - динамическая вязкость раствора, газа и масла соответственно,  $k_0$  - абсолютная проницаемость,  $p$  - давление.

Уравнения (3) – (5) отвечают за изменение вектора фильтрации в окислителе, газе и масле соответственно.

Подстановка закона Дарси многофазной фильтрации в уравнения неразрывности и дальнейшее обезразмеривание этих уравнений дают следующий результат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} (S) - \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left( S^2 \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \tilde{p} \right) = -\zeta_{R_1} \tilde{r} + \zeta_{H_2O} \tilde{r} \\ \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} (Sc) - \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left( S^2 c \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \tilde{p} \right) = -\zeta_{R_1} \tilde{r} \\ \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} (1-S-S_m) - \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left( \frac{(1-S-S_m)^2}{\mu} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \tilde{p} \right) = \zeta_{CO_2} \frac{\tilde{r}}{\rho} \\ \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} (S_m) - \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left( \frac{S_m^2}{\mu_1} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \tilde{p} \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} \tilde{m} = -\zeta_{R_2} \frac{\tilde{r}}{\sigma} \end{array} \right. \quad (6)$$

Скорость реакции:  $\tilde{r} = N\tilde{m}Sc$

Были введены следующие безразмерные параметры задачи:

$$\rho = \frac{\mu_{gas}}{\mu_{sol}}, \quad \mu = \frac{\mu_{gas}}{\mu_{sol}}, \quad N = \frac{\tau_0}{\tau} \sigma = \frac{1}{Da} \sigma, \quad \sigma = \frac{m_0}{\phi \rho_{sol}}, \quad \mu_1 = \frac{\mu_m}{\mu_{sol}},$$

где  $Da$  - число Дамкелера,  $\tau_0 = \frac{\mu_{sol} L^2 \phi}{k_0 \Delta P}$  - характерное время фильтрации.

Краевые условия данной модели задали следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{p}(0, t) &= 1 & \tilde{p}(x, 0) &= 0 \\ \tilde{p}(1, t) &= 0 & S(x, 0) &= 0 \\ S(0, t) &= 1 & S_m(x, 0) &= 1 \\ S_m(0, t) &= 0 & c(x, 0) &= 0 \\ c(0, t) &= c_0 & \tilde{m}(x, 0) &= 1 \end{aligned}$$

Также произведен расчет не только с постоянным давлением, а с постоянным расходом. Для этого из эксперимента была получена зависимость давления на входе от времени и подставлена в разностную схему в качестве граничного условия.

### 1.1. Стандартные значения параметров задачи

В ходе численного моделирования использовались следующие значения параметров задачи:

$\rho = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{sol}}$	$\mu = \frac{\mu_{gas}}{\mu_{sol}}$	$\mu_1 = \frac{\mu_m}{\mu_{sol}}$	$\zeta_{R_1}$	$\zeta_{R_2}$	$\zeta_{H_2O}$	$\zeta_{CO_2}$
$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^2$	1	1	1	1

$\Delta P, [Па]$	$L, [м]$	$k_0, [м^2]$	$\mu_{sol}, [Па \cdot с]$	$\mu_{gas}, [Па \cdot с]$	$\rho_{sol}, \left[ \frac{кг}{м^3} \right]$	$\rho_{gas}, \left[ \frac{кг}{м^3} \right]$
$10^4$	0.3	$2.7 \cdot 10^{-14}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^3$	1

$\tau_0, [с]$	$Da = \frac{\tau}{\tau_0}$	$N = \frac{\tau_0}{\tau} \sigma$	$c_0$	$\varphi$	$\sigma$	$\mu_m, [Па \cdot с]$
$10^2$	$10^{-2}$	$10^2$	0.5	0.3	1	1

Характерное время фильтрации определялось в соответствие с формулой:

$$\tau_0 = \frac{\mu_{sol} L^2 \phi}{k_0 \Delta P} = \frac{10^{-2} \cdot 0.3^2 \cdot 0.3}{2.7 \cdot 10^{-14} \cdot 10^4} = 10^2 с$$

Для численной реализации модели многофазной фильтрации при химической реакции окисления с образованием газовой фазы был выбран метод IMPES (неявный по давлению и явный по насыщенности). Основная его идея – получение одного уравнения для давления комбинацией уравнений фильтрации отдельных флюидов. После прогноза изменения давления явно рассчитываются новые значения насыщенности.

В результате численного моделирования был обнаружен колебательный режим многофазного течения в пористой среде, при котором поровое давление и фазовые насыщенности испытывают квазипериодические колебания. В первом случае давление на входе было постоянным, во втором случае оно менялось (расход был постоянным). Зависимость давления на фронте реакции от времени показана на рис. 2 и рис. 3.

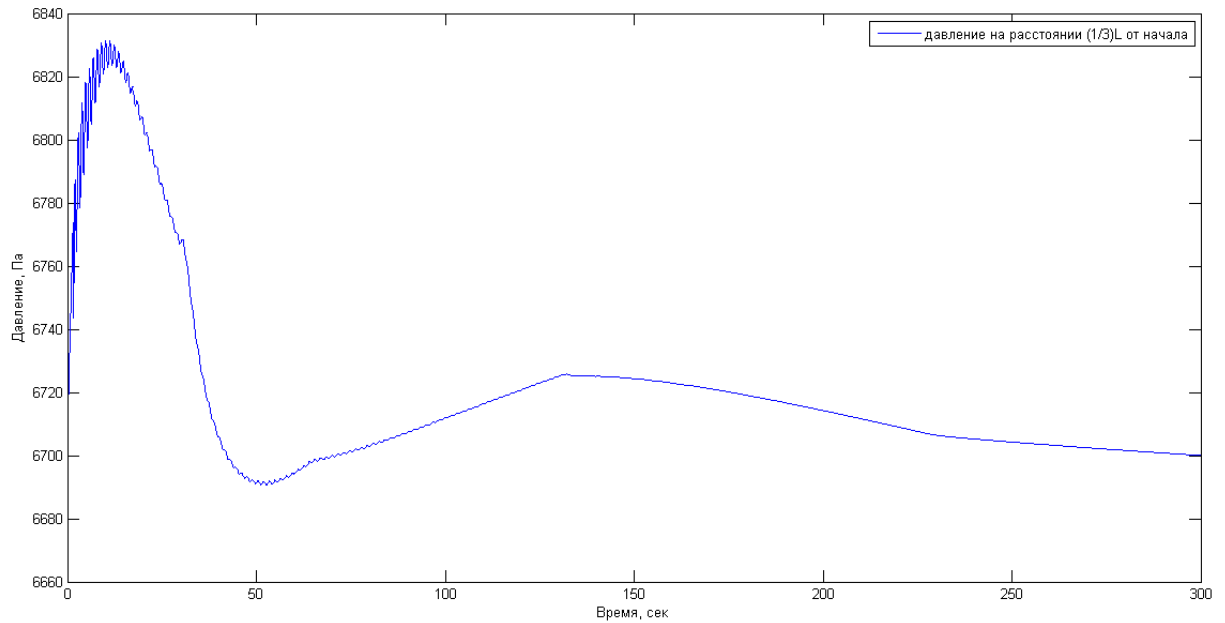


Рис.2. Зависимость давления на фронте реакции от времени (постоянное давление).

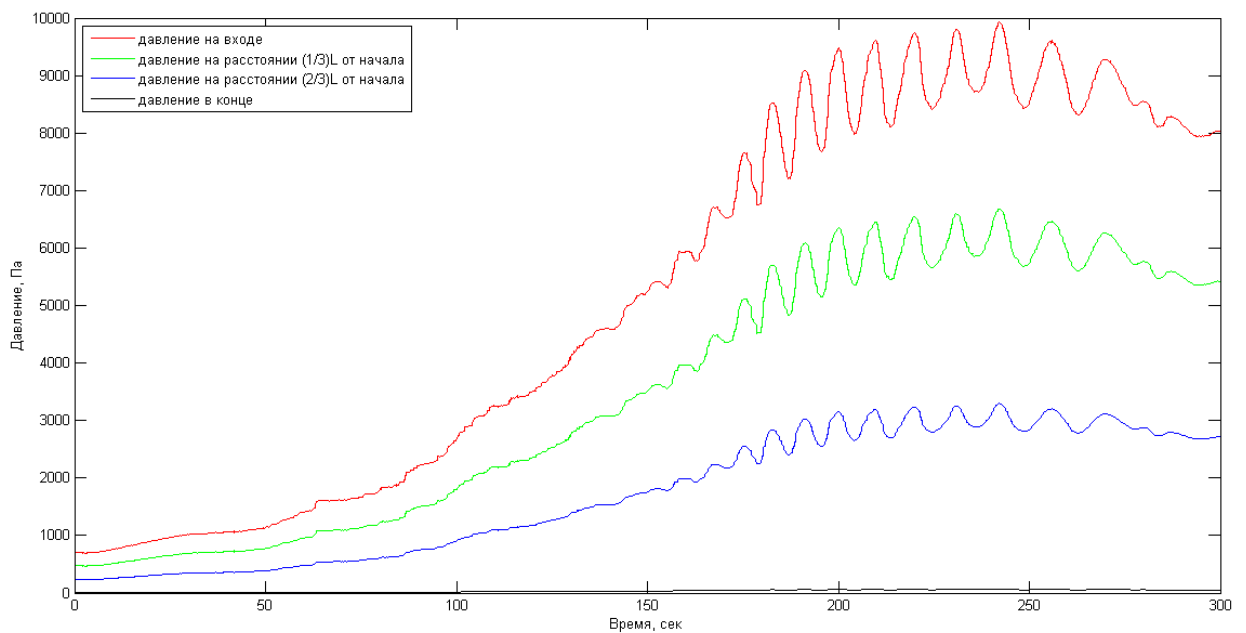


Рис.3. Зависимость давления на фронте реакции от времени (постоянный расход).

В результате данной работы было получено, что при фильтрации в пористой среде с выделением газовой фазы могут наблюдаться автоколебания – образование вторичных волн окисления. Колебания появляются только при значительном выделении газа на фронте реакции. Предложенная численная модель показывает достаточно точные результаты, что качественно подтверждает эксперимент.

#### Литература

1. *Кондауров В. И., Конюхов А.В.* Модель неполных фазовых превращений газовых гидратов в пористой среде. - Прикладная математика и механика (ПММ). - 2011. - т. 75(1). - С.39-60.
2. *Х. Азиз, Э. Сеттари.* Математическое моделирование пластовых систем (перевод с английского А. В. Королева и В. П. Кестнера). - Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2004. - 416 стр.