

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Алексей Викторович ТАТОСОВ<sup>1</sup>  
Артем Игоревич ВАРАВВА<sup>2</sup>

УДК 539.3

## ОЧИСТКА ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ СКВАЖИНЫ

<sup>1</sup> доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры математического моделирования,  
Тюменский государственный университет  
atatosov@utmn.ru

<sup>2</sup> аспирант, Тюменский государственный университет  
artevar@yandex.ru

### Аннотация

В последние годы повысился интерес к использованию для интенсификации добычи нефти термохимических обработок. Одним из перспективных и представляющих научный интерес является метод подачи в продуктивный пласт реагирующей энерговыделяющей бинарной смеси, основным компонентом которой является водный раствор нитрата аммония. В ходе экзотермической реакции, инициирующейся в пласте, прогревается призабойная зона скважины, а выделяющееся большое количество газа под давлением входит в пласт. В результате обработки бинарными смесями понижается вязкость нефти, из призабойной зоны устраняется кальматация, вымываются

---

**Цитирование:** Татосов А. В. Очистка призабойной зоны скважины / А. В. Татосов, А. И. Варавва // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 3. С. 85-93.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-85-93

---

загрязнения и парафины. При плавлении твердого парафина возрастает объем пор, доступный для фильтрации, вследствие чего повышается продуктивность скважины. В данной работе предложена математическая модель, позволяющая описать процессы, происходящие при закачке бинарной смеси в пласт: химическую реакцию разложения нитрита аммония, расплавление и вымывание отложений парафинов и загрязнений, повышение давления и температуры, возникающие вблизи скважины. Модель учитывает изменения пористости, связанные как с растворением твердых парафинов, так и с сжимаемостями флюидов и скелета породы. Предложен численный алгоритм решения представленной системы уравнений. Рассмотрен пример расчета подачи бинарной смеси в вертикальную скважину с заданной приемистостью в течение определенного промежутка времени. Изучено влияние определяющих параметров задачи на характер многофазного течения. Установлено, что в ходе реакции температура в призабойной зоне скважины повышается, что приводит к растворению твердого парафина и последующему его вымыванию. Вблизи скважины наблюдается кратковременное значительное повышение давления.

#### Ключевые слова

Пористая среда, фильтрация, жидкость.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-85-93

#### Основные уравнения

На практике применяются различные способы борьбы с накопленными отложениями в продуктивном пласте [4; 8; 10]. В [6] предложено описание подачи в пласт энерговыделяющей бинарной смеси без учета изменения ее объема. Введем в базовую модель [6] газовую фазу, которая появляется в результате реакции компонентов подаваемой смеси и не смешивается с жидкостями. Выделим три подвижные фазы, существенно различающиеся по свойствам. Каждая из этих фаз перемещается с собственной скоростью фильтрации, общей для составляющих ее компонент.

Первая фаза включает воду, компоненты бинарной смеси и растворимые продукты реакции. Ее истинная плотность  $\rho_1$  есть функция концентрации указанных составляющих:

$$\rho_1 = \rho_1(C_w, C_s, C_r), \quad (1)$$

где  $C_w$ ,  $C_s$ ,  $C_r$  — массовые концентрации несущей жидкости, реагентов и растворимых продуктов реакции.

Вторая фаза — подвижная нефть с растворенным в ней жидким парафином. Истинная плотность второй фазы определяется конкретным составом нефти и массовым содержанием  $C$  в ней парафинов:

$$\rho_2 = \rho_2(C). \quad (2)$$

Третья фаза — газ, выделяемый из смеси и подчиняющийся уравнению состояния

$$f(p_g, \rho_g, T_g) = 0.$$

Четвертая фаза — твердый парафин, осевший на скелете породы, содержание которого будем характеризовать усредненной плотностью  $a$  (масса твердого парафина, отнесенная к единице объема пористой среды). Истинная плотность фазы  $\rho_p$ . Плавление твердого парафина и вовлечение его в поток приводит к изменению пористости  $m$  среды. Доля объема пор  $x_p$ , занятая неподвижным парафином, есть  $(m_0 - m) / m_0$ ,  $m_0$  — пористость скелета. Связь

$$m = m_0(1 - x_p)$$

позволяет учитывать дополнительное изменение  $m$  вследствие сжимаемости породы, но в настоящей работе  $m_0 = const$ .

Таким образом, необходимо отслеживать перемещение трех компонент первой фазы, двух — второй, одну — третьей и одну — четвертой. Каждая подвижная фаза характеризуется своей насыщенностью  $s_1, s_2, s_g$ , скоростью фильтрации  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_g$ , а также давлениями. Для крупномасштабного приближения приемлема схема с общим  $p$ . Движение фаз подчиняется закону Дарси. В результате химической реакции выделяется тепловая энергия. В целях упрощения исходной системы будем считать температуру всех фаз, включая твердую породу, одинаковой и равной  $T$ . В итоге имеем пятнадцать неизвестных, три из которых векторные:

$$m, s_1, s_2, s_g, C_w, C_s, C_r, C, \rho_g, a, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_g, p, T.$$

Базовая модель подачи реагирующей бинарной смеси отражает основные законы механики сплошной среды [1-3] и будет представлять собой:

кинематические тождества

$$\begin{aligned} s_1 + s_2 + s_g &= 1, \\ C_w + C_s + C_r &= 1; \end{aligned} \quad (3)$$

уравнения перемещения первой фазы, реагентов бинарной смеси и растворимых продуктов реакции

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(ms_1\rho_1) + \nabla \cdot (\rho_1\mathbf{u}_1) &= -J_g, \\ \frac{\partial}{\partial t}(ms_1C_s\rho_1) + \nabla \cdot (C_s\rho_1\mathbf{u}_1) &= J_s, \\ \frac{\partial}{\partial t}(ms_1C_r\rho_1) + \nabla \cdot (C_r\rho_1\mathbf{u}_1) &= J_r; \end{aligned} \quad (4)$$

уравнение перемещения газовой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(ms_g\rho_g) + \nabla \cdot (\rho_g\mathbf{u}_g) = J_g, \quad (5)$$

уравнения перемещения нефти первоначального состава и жидкого парафина

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[ms_2(1 - C)\rho_2] + \nabla \cdot [(1 - C)\rho_2\mathbf{u}_2] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(ms_2C\rho_2) + \nabla \cdot (C\rho_2\mathbf{u}_2) &= J_p; \end{aligned} \quad (6)$$

уравнения, отражающие изменение содержания твердого парафина и пористости

$$\rho_p \frac{\partial m}{\partial t} = J_p, \quad (7)$$

$$a = \rho_p(m_0 - m);$$

уравнения Дарси и уравнение состояния газа

$$\mathbf{u}_{1,2,g} = -\frac{k k_{1,2,g}}{\mu_{1,2,g}} \nabla p, \quad (8)$$

$$f(p, \rho_g, T) = 0;$$

уравнение теплового баланса

$$\frac{\partial}{\partial t} [ms_1 c_1 \rho_1 T + ms_2 c_2 \rho_2 T + ms_g c_g \rho_g T + c_3 T] + \nabla \cdot (c_1 \rho_1 T \mathbf{u}_1 + c_2 \rho_2 T \mathbf{u}_2 + \rho_g h_g \mathbf{u}_g) = \kappa \nabla^2 T + Q_{in} + Q_{out}. \quad (9)$$

Коэффициент теплопроводности среды  $\kappa$  зависит от многих параметров, но для однотемпературной модели близок к соответствующему значению для твердого скелета;  $c_1, c_2, c_g$  — удельные теплоемкости подвижных фаз,  $s_3$  — теплоемкость твердой среды, отнесенная к единице объема;  $h_g$  — энтальпия газа.

В итоге имеем пятнадцать уравнений, из которых три векторных. Для замыкания системы необходимо задать плотности источников и конкретизировать функциональные зависимости от указанных переменных.

#### Интенсивность источников

Скорость перехода твердого парафина в жидкое состояние будем считать пропорциональной разности текущего значения концентрации  $C$  и максимально допустимого значения  $C^*$ , соответствующего фазовому равновесию

$$J_p = -k_p(C - C^*), \quad C^* = C^*(T). \quad (10)$$

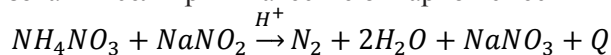
Скорость реакции пропорциональна мольной концентрации (доли) бинарной смеси. Интенсивность образования реагирующей смеси, отнесенная к единице объема первой фазы:

$$j_s = -k_s[C_s], [C_s] = \frac{C_s \rho_1}{M_s}, k_s = A_s \exp\left\{-\frac{E_s}{RT}\right\}.$$

Для единицы объема среды

$$J_s = ms_1 j_s. \quad (11)$$

При использовании селитры в качестве бинарной смеси



стехиометрические коэффициенты реакции дают связь интенсивностей образования компонентов

$$\frac{J_r}{J_s} = -\frac{M_r}{M_s} \frac{J_g}{J_s} = -\frac{M_g}{M_s} \frac{J_w}{J_s} = -\frac{2M_w}{M_s};$$

$$M_s = M_{NH_4NO_3} + M_{NaNO_2}, M_r = M_{NaNO_3}, M_g = M_{N_2}, M_w = M_{H_2O},$$

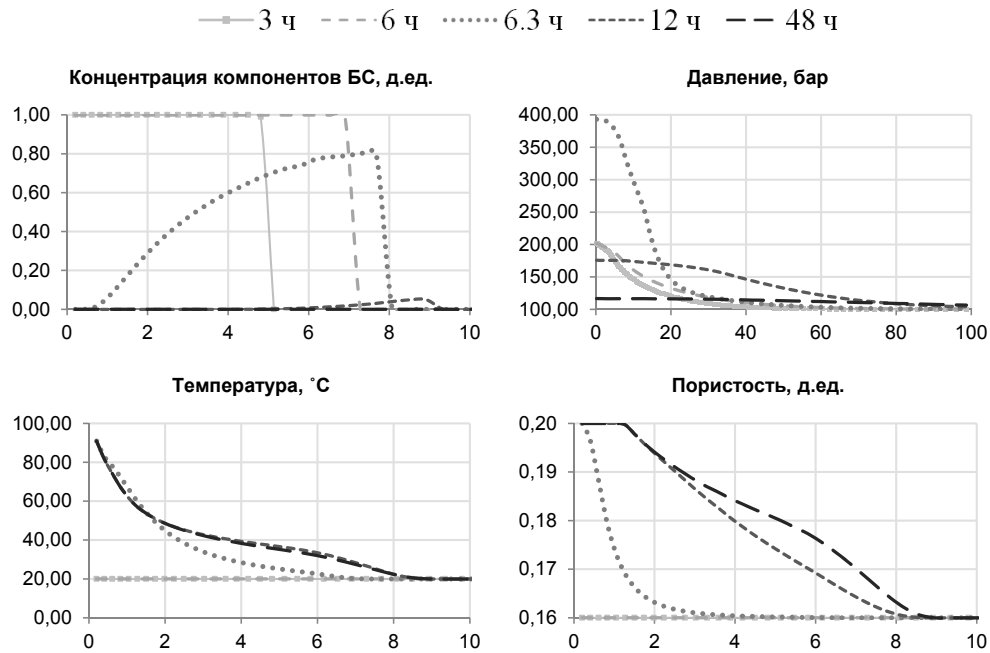


Рис. 1. Результаты расчета подачи реагирующей бинарной смеси в пласт

Fig. 1. The calculation of feed results in a binary mixture of reactive layer

при этом

$$J_s + J_r + J_g + J_w = 0.$$

Для водной компоненты смеси

$$\frac{\partial}{\partial t} [ms_1(1 - C_s - C_r)\rho_1] + \nabla \cdot [(1 - C_s - C_r)\rho_1 \mathbf{u}_1] = J_w,$$

что вытекает из уравнений (4).

Плотность источников тепла:

$$\begin{aligned} Q_{in} &= -q_s J_s, \\ Q_{out} &= -q_p J_p + q_{out}, \\ q_{out} &= -K_A(T - T_0). \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициент  $K_A$  характеризует теплообмен пласта с окружающими породами,  $q_s$  — теплота реакции,  $q_p$  — скрытая теплота плавления парафина.

### Модельный пример

Вертикальная скважина находится в нефтяном пласте мощностью 10 м, имеющем проницаемость 100 мД и пористость 0,2. Пластовая температура 20°C, пластовое давление 100 атм. Изначально 20% пор заполнено парафином. Плотность нефти 900 кг/м<sup>3</sup>, вязкость — 100 сПз. В начальный момент времени начинается закачка бинарной смеси с приемистостью 120 м<sup>3</sup>/сут. Считалось, что в бинарную смесь добавлен ингибитор, замедляющий реакцию разложения

селитры на 6 часов [8]. За индукционный период закачивается 30 м<sup>3</sup> водного раствора бинарной смеси, после чего закачка останавливается. В пласте начинается происходить реакция, тепловой эффект которой 300 кДж/моль. Теплоемкость, теплопроводность и проницаемость породы — 1 000 кДж/кг, 1,8 Вт/м/К и 500 мД соответственно.

При описании фазовых проницаемостей использовались соотношения Кори-Брукса [5] с показателями степени равными двум. Растворимость парафинов принималась согласно [7]. При дискретизации уравнений движения по пространству использован метод контрольного объема. Плотности жидких фаз полагались постоянными, газ считался идеальным и калорически совершенным. Теплообмен с окружающими породами отсутствовал.

Результаты моделирования закачки бинарной смеси приведены на рис. 1. Линии на графиках соответствуют различным моментам времени. Видно, что в ходе химической реакции температура в призабойной зоне скважины повышается до 100 °С. Это приводит к растворению твердого парафина и вымыванию его из призабойной зоны. Вблизи скважины наблюдается кратковременное повышение давления до 400 бар.

### Заключение

В данной работе предложена математическая модель, позволяющая описывать подачу в продуктивный пласт химически активных реагентов, а также процессы, происходящие при этом: растворение и вымывание парафина, выделение и проникновение в пласт воды и газа, повышение давления и температуры вблизи скважины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренблатт Г. И. Движение жидкости и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. М.: Недра, 1984. 530 с.
2. Басниев К. С. Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1993. 414 с.
3. Ентов В. М. Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи / В. М. Ентов, А. Ф. Зазовский. М.: Недра, 1989. 232 с.
4. Звягин Г. А. Исследование источников загрязнения и технологий обработок нагнетательных скважин / Г. А. Звягин, П. М. Южанинов, А. И. Дзюбенко // Нефтепромышленное дело. 1982. № 11. С. 114-115.
5. Каневская Р. Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов / Р. Д. Каневская. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 330 с.
6. Татосов А. В. Очистка призабойной зоны скважины реагирующей бинарной смесью / А. В. Татосов, В. Д. Козлов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 4(4). С. 112-116.

7. Huang Z. A Fundamental Model Wax Deposition in Subsea Oil Pipelines / Z. Huang, H. S. Lee, M. Senra, H. S. Fogler // *AIChE Journal*. 2011. Vol. 57. No 11. Pp. 2955-2964. DOI: 10.1002/aic.12517
8. Kline W. E. Dissolution of Silicate Minerals by Hydrofluoric Acid / W. E. Kline, H. S. Fogler // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1981. Vol. 20(2). Pp. 151-161. DOI: 10.1021/i100002a008
9. Vershinin V. Mechanisms of Thermal-Pressure Induced Impact of Binary Mixture Reaction Near Wellbore / V. Vershinin, K. Fedorov, A. Lishchuk // *SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition (Moscow, Russia, 2016)*. SPE-182048-RU.
10. Williams B. B. Hydrofluoric Acid Reaction with Sandstone Formations / B. Williams. 1975.

**Alexey V. TATOSOV<sup>1</sup>**

**Artem I. VARAVVA<sup>2</sup>**

## **CLEANING THE BOTTOM-HOLE ZONE OF WELLS**

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,  
Department of Mathematical Modelling,  
Tyumen State University  
atatosov@utmn.ru

<sup>2</sup> Post-Graduate Student, Tyumen State University  
artevar@yandex.ru

### **Abstract**

In recent years, interest in the use of oil production intensification of thermochemical treatments increased. One of perspective and scientific interest is a method of feeding into the reservoir responsive energy emitting binary mixture, the main component of which is an aqueous solution of ammonium nitrate. During the exothermic reaction initiated in the reservoir, the area near wellbore is warming up, and a large amount of gas under pressure enters the formation. As a result of the processing of binary mixtures of oil the viscosity decreases, clogging of the bottom zone is removed, dirt and paraffins washed out. Upon melting paraffin wax the pore volume available for filtering increases, thereby increasing the productivity of the well. In this paper we propose a mathematical model describing the processes that occur when downloading a binary mixture into a layer: a chemical reaction decomposition of ammonium nitrite, melting and washing away deposits of paraffin and dirt, pressure and temperature that occur near the well. The model takes into account the changes in porosity associated with the dissolution of a paraffin wax and a compressibilities fluid and the rock matrix. A numerical algorithm for solving the system of equations is presented. An example of calculation in a binary mixture feed vertical well bore at a predetermined pick-up over a period of time is observed. The effect of determining the parameters of the problem on the nature of multiphase flow is studied. It is found that the reaction temperature in the well bottom zone increases, which results in the dissolution of solid paraffin and its subsequent leaching. Near the well there is a significant short-term pressure.

---

**Citation:** Tatosov A. V., Varavva A. I. 2016. "Cleaning the Bottom-Hole Zone of Wells". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 3, pp. 85-93.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-85-93

---



**Keywords**

Porous media, filtration, fluid.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-85-93**

**REFERENCES**

1. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. 1984. *Dvizhenie zhidkosti i gazov v prirodnykh plastakh [Movement of Liquids and Gases in natural Reservoirs]*. Moscow: Nedra.
2. Basniev K. S., Kochina I. N., Maksimov V. M. 1993. *Podzemnaya gidromekhanika [Underground Hydromechanics]*. Moscow: Nedra.
3. Entov V. M., Zazovskiy A. F. 1989. *Gidrodinamika protsessov povysheniya nefteotdachi [Hydrodynamics of Enhanced Oil Recovery Processes]*. Moscow: Nedra.
4. Huang Z., Lee H. S., Senra M., Fogler H. S. 2011. "A Fundamental Model Wax Deposition in Subsea Oil Pipelines". *AIChE Journal*, vol. 57, no 11, pp. 2955-2964. DOI: 10.1002/aic.12517
5. Kanevskaya R. D. 2002. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov [Mathematical Modeling of Hydrodynamic Processes of Hydrocarbon Field Development]*. Moscow-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy.
6. Kline W. E., Fogler H. S. 1981. "Dissolution of Silicate Minerals by Hydrofluoric Acid." *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 20(2), pp. 151-161. DOI: 10.1021/i100002a008
7. Tatosov A. V., Kozlov V. D. 2015. "Ochistka prizaboynoy zony skvazhiny reagiruyushchey binarnoy smes'yu" [Cleaning Bottom Hole Zone Reacting Binary Mixtures]. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 1, no 4(4), pp. 112-116.
8. Vershinin V., Fedorov K., Lishchuk A. 2016. "Mechanisms of Thermal-Pressure Induced Impact of Binary Mixture Reaction Near Wellbore". Paper Presented at SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition (Moscow). SPE-182048-RU.
9. Williams B. B. 1975. Hydrofluoric Acid Reaction with Sandstone Formations.
10. Zvyagin G. A., Yuzhaninov P. M., Dzyubenko A. I. 1982. "Issledovanie istochnikov zagryazneniya i tekhnologiy obrabotok nagnetatel'nykh skvazhin" [The Study of Pollution Sources and Technologies Treatments Injectors]. *Neftepromyslovoe delo*, no 11, pp. 114-115.