ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕАГИРУЮЩЕЙ БИНАРНОЙ СМЕСЬЮ НА ПРОДУКТИВНЫЙ ПЛАСТ

BINARY MIXTURE IMPACT ON THE RESERVOIR

А. С. Шляпкин

Aleksei S. Shlyapkin

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»,
филиал «КогалымНИПИнефть»,
г. Тюмень, Российская Федерация

LUKOIL-Engineering LLC,
KogalymNIPIneft Branch,
Tyumen, Russian Federation

А. В. Татосов

Aleksei V. Tatosov

Тюменский государственный
университет,
г. Тюмень, Российская Федерация

Tyumen State University,
Tyumen, Russian Federation

Большинство месторождений в России имеют коэффициент извлечения нефти, не превышающий величину 0,4. Проблема извлечения остаточных запасов нефти является актуальной. Благодаря комплексному подходу, включающему использование бинарных смесей, становится возможным воздействие на слабо дренируемые участки недр. Метод позволяет продлить время работы скважины, очищая призабойную зону, в частности, широко используется на месторождениях Западной Сибири. К недостаткам метода можно отнести сложность контроля при воспроизведении термогазохимической реакции в продуктивном пласте. Бинарные смеси — это водные растворы селитры и инициатора их разложения. Выбор аммиачной селитры не случаен: компонент довольно доступен, а также достаточно экологичен, может быть использован в качестве минерального удобрения. Второй компонент также общедоступен, а именно, нитрит натрия. Компоненты реагируют в интервале продуктивного пласта под пакером. Это своего рода термохимический газогенератор, в процессе работы которого происходит химическая реакция с выделением тепла. Выделившееся тепло способствует нагреву пласта и создает благоприятные условия для газлифта. Закачка бинарных смесей производится на законсервированных скважинах и месторождениях, а также на месторождениях высоковязкой нефти. Закачанная смесь, реагируя, разогревает пласт и создает условия для газлифта, который работает, в основном, за счет энергии окисления нефти кислородом, выделившимся в ходе реакции. Предложена трехфазная математическая модель воздействия реагирующей бинарной смесью на призабойную зону скважины. Учтены эффекты разогрева пласта и выделения газа. Проведен детальный анализ уравнения переноса тепла.

Most of the fields in Russia have an oil recovery factor not exceeding 0.4. The problem of extracting residual oil reserves is urgent. Due to the complex approach including the usage of binary mixtures, it becomes possible to impact on weakly drained subsoil areas. The method allows to extend the working time of the well, clearing bottom-hole zone, in particular, it is widely used in the fields of Western Siberia. The disadvantages of the method include the complexity of control in the reproduction of thermogasochemical reaction in the productive formation. Binary mixtures are aqueous solutions of nitrates and the initiator of their decomposition. The choice of ammonium nitrate is not accidental: the component is quite affordable, as well as quite environmentally friendly, can be used as a mineral fertilizer. The second component is also generally available, namely, sodium nitrite. The components react in the interval of the productive formation under the packer. This is a kind of thermochemical gas generator, in the process of which a chemical reaction takes place with the release of heat. The released heat contributes to the heating of the reservoir and creates favorable conditions for gas lift. Injection of binary mixtures is carried out at canned wells and fields, as well as in highly viscous oil fields. The reacting injected mixture warms the reservoir and creates conditions for gas lift, which works, mainly, due to the energy of oxidation of oil by oxygen, released during the reactions. A three-dimensional mathematical model of a reactive binary mixture impact on the reservoir is proposed. The effects of the formation heating and gas evolution are taken into account. The heat transfer equations are analyzed.

Ключевые слова

высоковязкая
нефть,
бинарная смесь,
пористая среда,
призабойная
зона,
многофазная
фильтрация,
экзотермическая
реакция

Key words

high viscosity oil,
binary mixture,
porous medium,
bottomhole zone
of well,
multiphase
filtration,
exothermic
reaction

Введение

На практике применяются различные методы интенсификации добычи высоковязкой нефти. Одним из перспективных и представляющих научный интерес является метод подачи в продуктивный пласт энерговыделяющей бинарной смеси. В работах [1, 2] предлагается обрабатывать призабойную зону пласта бинарной смесью, основным компонентом которой является водный раствор двух солей — нитрита натрия ($NaNO_2$) и нитрата аммония (NH_4NO_3). Компоненты бинарной смеси распадаются на ионы: NH_4^+ , Na^+ , NO_3^- , NO_2^- . Через некоторое время в пласте под действием кислотных катализаторов инициируется экзотермическая реакция образования азота и воды:

В результате реакции прогревается призабойная зона, а выделяющийся газ под давлением рассеивается в пласте. После обработки бинарными смесями понижается вязкость нефти, увеличивается естественная трещиноватость карбонатных коллекторов [3, 4].

Основные уравнения

Дополним [5] построением трехфазной математической модели, описывающей воздействие на призабойную зону скважины. Выделим подвижные фазы, существенно различающиеся по свойствам. Каждая из фаз перемещается с собственной скоростью фильтрации, общей для составляющих ее компонент. Первая фаза включает воду и растворимые продукты реакции:

Ее истинная плотность ρ_1 есть функция массовых концентраций компонентов C_{1k} :

$$\rho_1 = \rho_1(C_{1k}), \quad k = 0, \dots, 4.$$

Вторая фаза — нефть, третья — выделяющийся газ.

Пористость скелета m считалась постоянной, но основные уравнения допускают ее изменение совместно с плотностью ρ_0 . Каждая фаза характеризуется своей насыщенностью S_k , скоростью фильтрации u_i , 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 .

Модель подачи реагирующей бинарной смеси отражает основные законы сохранения [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(ms_1 C_{1k} \rho_i) + \nabla \cdot (C_{1k} \rho_1 u_1) = J_{1k},$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(ms_2 \rho_2) + \nabla \cdot (\rho_2 u_2) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(ms_3 \rho_3) + \nabla \cdot (\rho_3 u_3) = J_3,$$

$$u_i = -\frac{kk_i}{\mu_i} \nabla p,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-m) \rho_0 e_0 + \sum_{i=1}^3 ms_i \rho_i e_i \right] + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i h_i u_i =$$

$$= \nabla \cdot \left[(1-m) \kappa_0 + \sum_{i=1}^3 ms_i \kappa_i \right] \nabla T,$$

$$\sum_{i=1}^3 s_i = 1, \quad \sum_{k=0}^4 C_{1k} = 1. \quad (1)$$

Здесь ρ_i, e_i, h_i — плотность, внутренняя энергия и энтальпия фаз, включая твердую породу. Кинетической энергией пренебрегаем. Общий перенос первой фазы определяется суммированием по всем компонентам:

$$\frac{\partial}{\partial t}(ms_1 \rho_1) + \nabla \cdot (\rho_1 u_1) = \sum_{k=0}^4 J_{1k} = J_1. \quad (2)$$

Уравнение энергии можно переписать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-m) \rho_0 h_0 + \sum_{i=1}^3 ms_i \rho_i h_i \right] + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i h_i u_i - \frac{\partial p}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T. \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности среды κ близок к соответствующему значению для твердого скелета $\kappa = \kappa_0$.

Замыкающие соотношения

Интенсивность источников

Скорость реакции пропорциональна мольным концентрациям (долям) реагирующих веществ. Интенсивность реакции, отнесенная к единице объема первой фазы:

$$j = k[C_{11}][C_{14}]; \quad [C_{1k}] = \frac{C_{1k} \rho_1}{M_{1k}},$$

$$k = A \exp \left\{ -\frac{E}{RT} \right\}.$$

Стехиометрические коэффициенты реакции дают скорости образования компонентов:

$$j_{11} = j_{14} = -j, \quad j_{12} = j_{13} = 0, \\ j_{10} = 2j, \quad j_3 = j.$$

Для единицы объема среды скорость образования массы компонентов:

$$J_{1k} = m s_1 j_{1k} M_{1k}, \quad J_3 = m s_1 j_3 M_3;$$

$$M_{11} = M_{NH_4}, M_{12} = M_{Na}, M_{13} = M_{NO_3},$$

$$M_{14} = M_{NO_2}, M_{10} = M_{H_2O}, M_3 = M_{N_2};$$

при этом:

$$J_{11} + J_{14} + J_3 = 0.$$

С учетом начальных условий имеет место равенство мольных долей:

$$[C_{11}] = [C_{14}], \quad [C_{12}] = [C_{13}].$$

Уравнения состояния

Примем аддитивность удельных объемов составляющих водной смеси

$$\frac{1}{\rho_1} = \sum_{k=0}^4 \frac{C_{1k}}{\rho_{1k}}.$$

Первая фаза несжимаемая

$$\rho_{1k} = const;$$

нефтяная фаза представляет собой слабо-сжимаемую среду

$$\rho_2 - \rho_2^0 = \frac{p - p_0}{a_2^2}, \quad a_2^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho_2} \right)_T;$$

выделяющийся в ходе реакции азот подчиняется уравнению

$$\rho_3 = \frac{p M_3}{RT};$$

пространственный перенос породы отсутствует

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - m) \rho_0] = const.$$

Внутренняя энергия и энтальпия фаз

$$h_i = e_i + \frac{p}{\rho_i}; \quad i = 1, \dots, 3;$$

$$h_1 = \sum_{k=0}^4 C_{1k} h_{1k};$$

$$h_{1k} = c_{1k}(T - T_0) + \frac{p - p_0}{\rho_{1k}} + h_{1k}^0;$$

$$h_2 = c_2(T - T_0) + \frac{p - p_0}{\rho_2};$$

$$h_3 = c_3(T - T_0) + h_3^0;$$

$$h_0 = c_0(T - T_0) + \frac{p - p_0}{\rho_0};$$

условие нормировки

$$h_3^0 + h_{10}^0 \frac{2M_{10}}{M_3} - h_{11}^0 \frac{M_{11}}{M_3} - h_{14}^0 \frac{M_{14}}{M_3} = -L_3. \quad (4)$$

Здесь ρ_{1k} и C_{1k} — истинные плотности и теплоемкости компонентов, C_i — теплоемкости фаз; L_3 — теплота реакции, отнесенная к единице массы образовавшегося газа. Теплота реакции L , приходящаяся на единицу массы исходной сухой бинарной смеси, связана с L_3 соотношением

$$L \sum_{k=1}^4 M_{1k} = L_3 M_3.$$

Для энтальпии нефтяной компоненты второй фазы более точное выражение:

$$h_2 = c_2(T - T_0) + \frac{p^2 - p_0^2}{2(\rho_2 a_2)^2} + \frac{p - p_0}{\rho_2},$$

однако в дальнейшем данное изменение будем считать несущественным.

Уравнение энергии (3) принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - m) c_0 \rho_0 T' + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_i T' \right] + \\ + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i T' u_i - \frac{\partial}{\partial t} (m s_3 p') + \nabla \times \\ \times \sum_{i=1}^2 p' u_i + \sum_{k=1}^4 h_{1k}^0 J_{1k} + h_3^0 J_3 = \kappa \nabla^2 T'.$$

Здесь $T' = T - T_0$, $p' = p - p_0$ — отклонения от равновесных значений. Учитывая нормировку энтальпий (4) примет вид:

$$\sum_{k=1}^4 h_{1k}^0 J_{1k} + h_3^0 J_3 = \\ = \left(h_3^0 + h_{10}^0 \frac{2M_{10}}{M_3} - h_{11}^0 \frac{M_{11}}{M_3} - h_{14}^0 \frac{M_{14}}{M_3} \right) J_3 = -L_3 J_3,$$

найдем

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - m) c_0 \rho_0 T' + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_i T' - m s_3 p' \right] + \\ + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i T u_i + \nabla \cdot \sum_{i=1}^2 p' u_i = \kappa \nabla^2 T' + L_3 J_3. \quad (5)$$

При переходе для газовой фазы к теплоемкости при постоянном объеме

$c_3 = c_{V3} + R/M_3$, для остальных $c_i \approx c_{Vi}$, уравнение энергии (5) переписывается в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-m)c_0\rho_0 T' + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_{Vi} T' \right] + \\ + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_{Vi} T' u_i + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 p' u_i = \kappa \nabla^2 T' + L_3 J_3, \quad (6)$$

Учет неидеальности газовой фазы требует корректировки уравнений состояния $f(p, \rho_3, T) = 0$. С целью ведения теплового эффекта реакции выделим производные от энтальпии в исходном соотношении (3). Имеем:

$$(1-m)\rho_0 \frac{\partial h_0}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} + \\ + \sum_{i=1}^3 \rho_i u_i \cdot \nabla h_i - \frac{\partial p}{\partial t} + \\ + \sum_{i=1}^2 \sum_k h_{ik} J_{ik} + L_3 J_3 = \kappa \nabla^2 T.$$

Здесь учтены уравнения неразрывности фаз и их компонент. Представив дифференциал энтальпии в виде:

$$dh_i = c_i dT + c_i \varepsilon_i dp,$$

где c_i — теплоемкость, ε_i — коэффициент Джоуля-Томсона,

$$\varepsilon_i = \frac{1}{c_i} \left(\frac{\partial h_i}{\partial p} \right)_T = \frac{V_i - T(\partial V_i / \partial T)_p}{c_i}, \quad V_i = \frac{1}{\rho_i};$$

получим:

$$(1-m)\rho_0 c_0 \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} + \\ + \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i u_i \cdot \nabla T - \frac{\partial p}{\partial t} + \\ + \varepsilon_0 (1-m)\rho_0 c_0 \frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i m s_i \rho_i c_i \frac{\partial p}{\partial t} + \\ + \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i \rho_i c_i u_i \cdot \nabla p + \sum_{k=1}^4 h_{1k} J_{1k} + h_3 J_3 = \kappa \nabla^2 T.$$

Теплоемкость первой фазы определяется составом:

$$c_1 = \sum_{k=0}^4 C_{1k} c_{1k}.$$

Давление и температуру под производными заменим отклонениями. Вводя коэффициент адиабатичности:

$$\eta_i = \frac{1}{\rho_i c_i} - \varepsilon_i = \frac{T(\partial V_i / \partial T)_p}{c_i},$$

будем иметь:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-m)\rho_0 c_0 T' + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_i T' \right] + \\ + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i T' u_i - (1-m)\eta_0 \rho_0 c_0 \frac{\partial p'}{\partial t} - \\ - \sum_{i=1}^3 m \eta_i s_i \rho_i c_i \frac{\partial p'}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i \rho_i c_i u_i \cdot \nabla p' + \\ + \sum_{k=1}^4 (h_{1k} - c_{1k} T') J_{1k} + (h_3 - c_3 T') J_3 = \kappa \nabla^2 T'.$$

Сохранив адиабатический эффект только для газовой фазы, полагая для остальных $\eta_i = 0, \varepsilon_i = 1/(\rho_i c_i), i \neq 3$, найдем окончательно:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-m)\rho_0 c_0 T' + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_i T' \right] + \\ + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i T' u_i - m \eta_3 s_3 \rho_3 c_3 \frac{\partial p'}{\partial t} + \\ + \sum_{i=1}^2 u_i \cdot \nabla p' + \varepsilon_3 \rho_3 c_3 u_3 \cdot \nabla p' + \\ + \sum_{k=1}^4 (h_{1k} - c_{1k} T') J_{1k} + (h_3 - c_3 T') J_3 = \kappa \nabla^2 T'.$$

Различие энтальпий дает приближенно:

$$\sum_{k=1}^4 (h_{1k} - c_{1k} T') J_{1k} + \\ + (h_3 - c_3 T') J_3 \approx -L_3 J_3, \quad (7)$$

так что

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-m)\rho_0 c_0 T' + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_i T' \right] + \\ + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i T' u_i - m \eta_3 s_3 \rho_3 c_3 \frac{\partial p'}{\partial t} + \\ + \sum_{i=1}^2 u_i \cdot \nabla p' + \varepsilon_3 \rho_3 c_3 u_3 \cdot \nabla p' \approx \kappa \nabla^2 T' + L_3 J_3. \quad (8)$$

Обычно разности энтальпий сразу заменяют теплотой реакции. Однако тепловой

эффект существенно зависит от температуры и давления. В приведенной форме уравнения энергии эта зависимость в некоторой степени учтена. Тем не менее, выделение дифференциала энтальпии не столь эффективно. Более достоверным представляется использование в уравнении (3) выражения для энтальпии газа в виде:

$$h_3 = c_3(T - T_0) + \varepsilon_3 c_3(p - p_0) + h_3^0,$$

предполагающее, конечно, постоянство ε_3 в рассматриваемом интервале изменения параметров. В этом случае будем иметь:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - m) c_0 \rho_0 T' + \sum_{i=1}^3 m s_i \rho_i c_i T' \right] + \\ & + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i T' u_i - m \eta_3 s_3 \rho_3 c_3 \frac{\partial p'}{\partial t} - p' \frac{\partial m s_3}{\partial t} + \\ & + \varepsilon_3 \rho_3 c_3 u_3 \cdot \nabla p' + \nabla \cdot \sum_{i=1}^2 p' u_i + \\ & + \varepsilon_3 c_3 p' J_3 = \kappa \nabla^2 T' + L_3 J_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Различие (8) и (9) незначительно и обусловлено использованием приближенного равенства (7). Для дальнейшего примем уравнение (9), считая $\varepsilon_3 c_3 p' / L_3 \ll 1$. В случае модели идеального газа (9) тождественно (5).

Фильтрационные параметры

Относительные фазовые проницаемости зададим в виде [7]:

$$k_1 = s_1^2, \quad k_3 = s_3^2, \quad k_2 = \frac{s_1(1 - s_1)^2 + s_3(1 - s_3)^2}{s_1 + s_3}.$$

Абсолютную проницаемость определим по формуле Козени:

$$k = \frac{k_0 m^3}{(1 - m)^2},$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александров Е.Н., Александров П.Е., Кузнецов Н.М., Лунин В.В., Леменовский Д.А., Рафиков Р.С., Чертенков М.В., Ширяев П.А., Петров А.Л., Лиджи-Горяев В.Ю. Высокотемпературный режим реакции бинарных смесей и стимулирование добычи на обводненных месторождениях // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 4. С. 312–320.
2. Вершинин В.Е., Вершинина М.В., Заволжский В.Б., Ганькин Ю.А., Идиятуллин Р.А., Соснин В.А., Зимин А.С., Лишук А.Н. Кинетика химических реакций при термогазохимическом воздействии на призабойную зону водными растворами бинарных смесей // Нефтяное хозяйство. 2016. № 12. С. 114–117.
3. Kline W.E., Fogler H.S. Dissolution of Silicate Minerals by Hydrofluoric Acid // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1981. Vol. 20. No. 2. P. 151–161.

где k_0 — абсолютная проницаемость скелета породы. Разогрев пласта существенно меняет вязкость нефти:

$$\mu_2 = \mu_{20} \exp \left\{ k_\mu \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}.$$

Вязкости газа и воды будем считать постоянными $\mu_1, \mu_3 = \text{const}$.

Начальные и краевые условия

В осесимметричной постановке:

$$u = u e_r, \quad \nabla = \frac{\partial}{\partial r} e_r, \quad \nabla \cdot = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) e_r,$$

начальные и граничные условия для уравнений движения с неизвестными:

$$p = p(r, t), \quad T = T(r, t),$$

$$s_i = s_i(r, t), \quad C_{1k} = C_{1k}(r, t);$$

$$r_w \leq r \leq r_e, \quad t \geq 0$$

имеют вид:

$$t = 0: \quad p = p_0, \quad T = T_0, \quad s_i = s_i^0, \quad C_{1k} = C_{1k}^0;$$

$$0 < t \leq \tau, \quad r = r_w: \quad p = p_w, \quad T = T_0, \quad s_i = s_i^w, \quad C_{1k} = C_{1k}^w;$$

$$t > \tau, \quad r = r_w: \quad \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r = r_e: \quad p = p_0, \quad T = T_0;$$

начало реакции $t = \tau, \quad r > \tau$.

В течение времени τ ведется нагнетание водного раствора химически активных компонентов заданного состава, реакция при этом заморожена. Затем скважина закрывается до окончания протекания в пласте химической реакции.

Выводы

Таким образом, формализована постановка задачи о закачивании в продуктивный пласт реагирующей бинарной смеси. Проанализированы различные подходы к обоснованию уравнения переноса тепла.

4. Звягин Г.А., Южанинов П.М., Дзюбенко А.И. Исследование источников загрязнения и технологий обработок нагнетательных скважин // Нефтепромысловое дело. 1982. № 11. С. 114–115.

5. Татосов А.В., Варавва А.И. Модель подачи реагирующей бинарной смеси в пласт // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 4. С. 195–200.

6. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 414 с.

7. Федоров К.М., Шарафутдинов Р.Ф. К теории неизотермической фильтрации с фазовыми переходами // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 5. С. 78–85.

REFERENCES

1. Aleksandrov E.N., Aleksandrov P.E., Kuznetsov N.M., Lunin V.V., Lemenovskii D.A., Rafikov R.S.,

Chertenkov M.V., Shiryayev P.A., Petrov A.L., A.L. Lidzhi-Goryaev V.Yu. Vysokotemperaturnyi rezhim reaktsii binarnykh smesei i stimulirovanie dobychi na obvodnennykh mestorozhdeniyakh [High-Temperature Reaction Regime of Binary Mixtures and Stimulation of Production at Waterfields]. *Neftekhimiya — Petroleum Chemistry*, 2013, Vol. 53, No. 4, pp. 312–320. [in Russian].

2. Vershinin V.E., Vershinina M.V., Zavolzhsky V.B., Gankin Yu.A., Idiyatullin R.A., Sosnin V.A., Zimin A.S., Lishchuk A.N. Kinetika khimicheskikh reaktsii pri termogazokhimicheskom vozdествii na prizaboinuyu zonu vodnymi rastvorami binarnykh smesei [Kinetics of Chemical Reactions in Thermogas Chemical Impact on Bottom-Hole Zone with Aqueous Solutions of Binary Mixtures]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2016, No. 12, pp. 114–117. [in Russian].

3. Kline W.E., Fogler H.S. Dissolution of Silicate Minerals by Hydrofluoric Acid. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1981, Vol. 20, No. 2, pp. 151–161.

4. Zvyagin G.A., Yuzhaninov P.M., Dzyubenko A.I. Issledovanie istochnikov zagryazneniya i tekhnologii obra-

botok magnetatel'nykh skvazhin [Investigation of Pollution Sources and Technologies of Treatments of Injection Wells]. *Neftpromyslovoe delo — Oilfield Business*, 1982, No. 11, pp. 114–115. [in Russian].

5. Tatosov A.V., Varavva A.I. Model' podachi reagi-ruyushchei binarnoi smesi v plast [Model of Feeding Binary Mixture in Plast]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya — Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2017, No. 4, pp. 195–200. [in Russian].

6. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground Hydro-mechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 414 p. [in Russian].

7. Fedorov K.M., Sharafutdinov R.F. K teorii neizotermicheskoi fil'tratsii s fazovymi perekhodami [On the Theory of Nonisothermal Filtration with Phase Transitions]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza — Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of Liquid and Gas*, 1989, No. 5, pp. 78–85. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Шляпкин Алексей Сергеевич, ведущий специалист, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», филиал «КогалымНИПИнефть», г. Тюмень, Российская Федерация

Aleksei S. Shlyapkin, Leading Specialist, LUKOIL-Engineering LLC, KogalymNIPIneft Branch, Tyumen, Russian Federation

e-mail: ShlyapkinAS@tmn.lukoil.com

Татосов Алексей Викторович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования, Институт математики и компьютерных наук, ТюмГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

Aleksei V. Tatosov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Math Modeling Department, Tyumen State University Institute of Mathematics and Computer Science, Tyumen, Russian Federation

e-mail: Atatosov@utmn.ru