

*Константин Михайлович ФЕДОРОВ —
профессор кафедры моделирования
физических процессов и систем,
доктор физико-математических наук*

*Александр Павлович ШЕВЕЛЕВ —
доцент кафедры моделирования
физических процессов и систем,
кандидат физико-математических наук
Тюменский государственный университет*

УДК 532.546

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКОГО ТЕРМОПОЛИМЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАЛЕЖИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

АННОТАЦИЯ. Предлагается методика численного исследования процесса периодического термополимерного воздействия.

The gel and heat water is considered. The procedure of optimal technological parameters search was developed for the improvement of the process.

Одним из основных факторов, определяющих нефтеотдачу пластов с содержанием высоковязких нефтей, является соотношение подвижностей нефти и вытесняющего реагента. Эта проблема заключается в образовании неустойчивых фронтов вытеснения, когда подвижность перед вытесняющим фронтом ниже, чем за ним. При соотношении подвижностей более пяти в пласте начинают активно формироваться «языки» высокоподвижной смеси, внедряющиеся в область с начальной водонасыщенностью. Решение проблемы заключается, как правило, в контроле подвижности всего потока путем добавления загущающих реагентов для снижения амплитуды скачков подвижности потока на фронтах.

Предложенный метод заключается в закачке в нагнетательные скважины горячей воды (первый этап) и последующей закачке раствора полимера (второй этап). Снижение фильтрационных сопротивлений за счет разогрева призабойной зоны в ходе первого этапа приводит к облегчению закачки раствора полимера. В дальнейшем эти операции повторяются. В данном методе за счет различной скорости распространения тепла и полимерной добавки в пласте происходит разделение фронта вытеснения на составляющие: а) вытеснение нефти холодной водой, б) вытеснение нефти холодным раствором полимера, в) вытеснение нефти горячим раствором полимера. В результате расширения области повышения подвижности потока в направлении от добывающих скважин к нагнетательным при правильном подборе концентрации полимера и температуры горячей воды удается минимизировать проявление процесса языкообразования и неустойчивого вытеснения. В этой главе проанализировано влияние количества и размеров оторочек, а также концентрации полимера в этих оторочках на коэффициент нефтеизвлечения.

Математическая модель неизотермического вытеснения нефти горячим раствором полимера включает уравнения сохранения масс водной фазы, нефти и полимера, уравнение притока тепла, а также законы Дарси для фильтрации воды и нефти:

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r m v_w S = 0, \quad m \frac{\partial(1-S)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r m v_o (1-S) = 0,$$

$$m \frac{\partial \left(S c + \Gamma c \frac{\rho_R (1-m)}{m \rho_w} \right)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r m v_w S c = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-m)H_r(T-T_0) + mH_w S(T-T_0) + mH_o(1-S)(T-T_0)] +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r m H_w S v_w (T-T_0) + r m H_o (1-S) v_o (T-T_0)] = \frac{2\alpha_T}{h} (T-T_0),$$

$$m v_w S = -\frac{k}{\mu_w} f_w \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad m v_o (1-S) = -\frac{k}{\mu_o} f_o \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r},$$

где S — водонасыщенность пористой среды; $C = c/c_0$ — массовая концентрация полимера; c_0 — начальная концентрация полимера; v_w, v_o — среднемассовые скорости воды и нефти; m — пористость; T_0 — температура закачиваемого теплоносителя; C_w, C_o, C_r — удельные теплоемкости воды, нефти и породы; ρ_w, ρ_r, ρ_o — плотности воды, нефти и породы; H_w, H_r, H_o — теплосодержания воды, породы и нефти; f_w, f_o — фазовые проницаемости воды и нефти.

Рассматриваемая методика прогнозирования основана на использовании функции Баклея-Левретта или фазовых проницаемостей и вязкостей фаз. Фазовые проницаемости пластов моделировались в виде стандартных потенциальных функций по методу Corey:

$$f_w(S) = \begin{cases} 0 & S \leq S_{wr} \\ \left(\frac{S - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{3.5} & S \geq S_{wr} \end{cases},$$

$$f_o(S) = \begin{cases} 0 & S \geq 1 - S_{or} \\ \left(\frac{1 - S - S_{or}}{1 - S_{wr} - S_{or}} \right)^{1.5} & S_{wr} < S < 1 - S_{or} \\ 1 & S \leq S_{wr} \end{cases}, \quad (14)$$

где S_{or}, S_{wr} — остаточные нефте- и водонасыщенности.

Зависимость вязкостей фаз от температуры и концентрации полимера аппроксимировались эмпирическими соотношениями:

$$\mu_w = \mu_w(T, C) = \mu_w^0 + (0,2 - \mu_w^0)T + (\mu_p - \mu_w^0 - (0,2 - \mu_w^0)T)C$$

$$\mu_o = \mu_o(T) = \mu_o^0 \exp(-5,8 \cdot T), \quad (15)$$

где μ_w^0, μ_o^0 — коэффициенты динамической вязкости воды и нефти при пластовых условиях; $\mu_p = 20 + (5 - 20)T$ — вязкость полимера.

Приведение уравнений (13) к безразмерному виду проводится с помощью замены переменных:

$$\tau = \frac{q_0 t}{\pi h (r_c^2 - r_w^2)}, \quad R = \frac{r^2 - r_w^2}{r_c^2 - r_w^2}, \quad \Theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0}, \quad (16)$$

где T_1 — температура теплоносителя; q_0 — начальный объемный расход.

При решении безразмерной системы уравнений был использован явный конечно-разностный метод. Количество пространственных ячеек в среднем равнялось 500 (в зависимости от размера оторочек этот шаг увеличивался до 1000). Величина шага по времени определялась из условия устойчивости Куранта. Моделируемый пласт имел следующие характеристики: пластовая температура — 30°C ; мощность нефтенасыщенных пород — 40 м; пористость — 0,2; объемный расход скважины — $0,0023 \text{ м}^3/\text{с}$; коэффициент теплопередачи — $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; вязкость нефти при пластовых условиях — $100 \text{ мПа} \cdot \text{с}$; вязкость воды — 1 сПз ; температура нагнетаемого теплоносителя 300°C ; радиус скважины — 0,1 м; радиус контура питания — 250 м; константа адсорбции Генри — 0,1; остаточная нефтенасыщенность — 0,3; остаточная водонасыщенность 0,2.

В ходе исследований установлено, что основной вклад в процесс вытеснения нефти вносит оторочка полимера, поскольку тепло, закачиваемое в пласт с горячей водой, за счет интенсивных теплопотерь прогревает лишь призабойную зону, таким образом, роль тепловых оторочек сводится к снижению фильтрационных сопротивлений призабойной зоны при закачке полимера.

На рис. 5 приведено влияние дробления оторочек закачиваемого теплоносителя и раствора полимера на динамику процесса вытеснения нефти при фиксированных объемах закачки, равных 0,1 порового объема для того и другого флюида. Установлено, что наиболее оптимальным вариантом является разбиение объемов закачки каждого реагента на 3 оторочки.

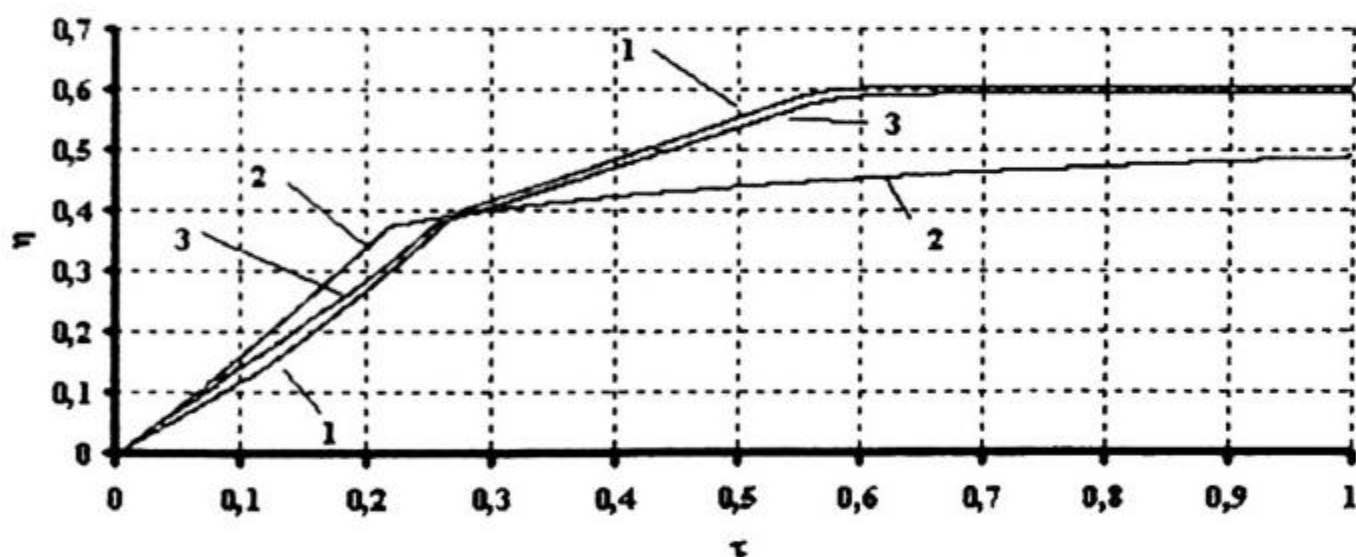


Рис. 5. Зависимость нефтеемкости от времени при:

- 1 — закачке чистого полимера, 2 — закачке холодной воды,
3 — последовательной закачке 0,1 поровых объема горячей воды и 0,1 полимера, разбитых на 3 и более оторочек

При вытеснении высоковязкой нефти главной проблемой является неустойчивость процесса. В ходе исследований было установлено, что предпочтительным является вариант закачки, в котором первой в пласт подается горячая вода, а не раствор полимера. Установлено также, что соотношение суммарных объемов оторочек существенно не влияет на поведение кривой нефтеемкости, а следовательно, и на сам процесс вытеснения. Это объясняется тем, что роль прогрева пласта ограничена лишь призабойной зоной (как показано выше), а эффективность вытеснения определяется размером оторочки раствора полимера.

Подвижностью называется сумма отношений фазовых проницаемостей и вязкостей фильтрующихся жидкостей. Отношение подвижностей перед фронтом вытеснения (λ^+) и за ним (λ^-) называется соотношением подвижностей (λ_{ef}). Если $\lambda_{ef} > 1$, то есть подвижность флюида перед фронтом вытеснения выше, чем подвижность за ним, то вытеснение устойчивое, если $\lambda_{ef} < 1$ то процесс вытеснения неустойчив, что ведет к образованию языков вытесняющей жидкости и ее раннему прорыву в добывающую скважину.

$$\lambda = \frac{f_w}{\mu_w} + \frac{f_o}{\mu_o}, \quad \lambda_{ef} = \frac{\lambda^+}{\lambda^-} \quad (17)$$

В ходе исследований устойчивости было установлено, что в процессе вытеснения нефти по технологии последовательного термополимерного воздействия наблюдается устойчивый передний фронт вытеснения нефти оторочкой полимера. В случае закачки 2 оторочек (горячая вода — раствор полимера) наблюдается сильно неустойчивый задний фронт вытеснения (подвижность возрастает почти в 20 раз). Закачка реагентов в виде 6 чередующихся оторочек позволяет сделать задний фронт вытеснения несколько устойчивее (подвижность постепенно возрастает примерно в 12 раз) за счет того, что область неустойчивости растягивается до 0,2 поровых объема, рис. 6. В области перекрытия оторочки горячей воды и полимера наблюдается устойчивое вытеснение пластовых флюидов.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что технология периодического термополимерного воздействия в целом не дает существенного выигрыша в динамике процесса нефтеизвлечения, но позволяет улучшить соотношение подвижностей жидкостей (снижение отношения подвижностей (λ_{ef}) и увеличение области возрастания эффективной подвижности).

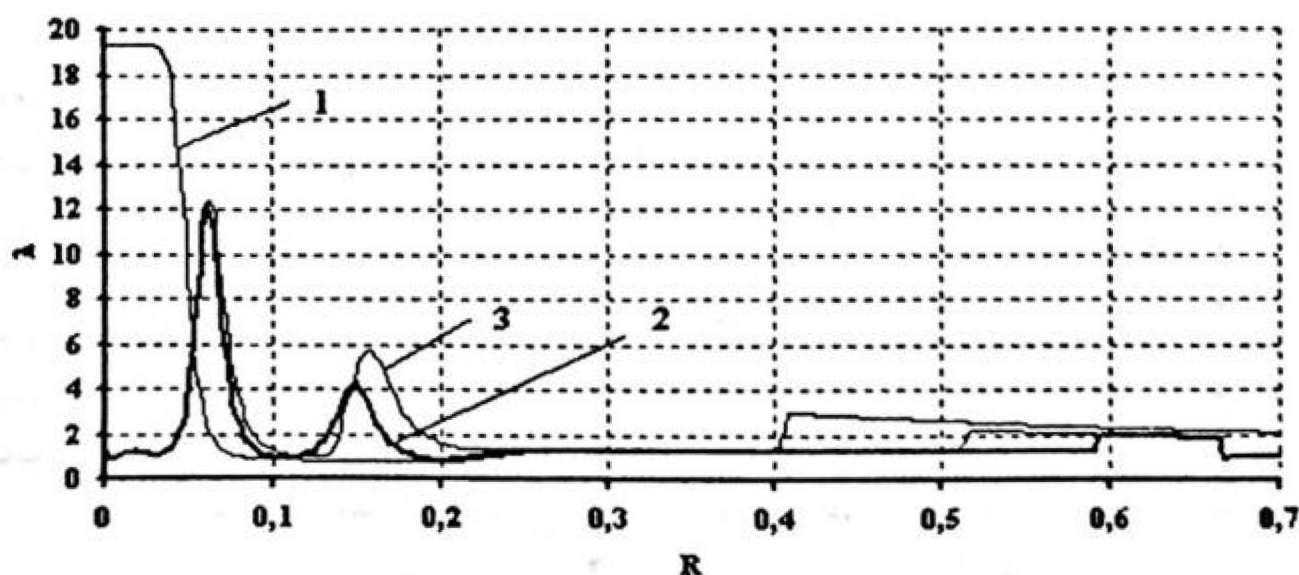


Рис. 6. Распределение по пласту подвижностей при закачке в пласт: 1 — 0,1 поровых объема горячей воды и 0,1 поровых объема оторочки полимера; 2 — 0,1 поровых объема горячей воды и 0,1 поровых объема оторочки полимера, разбитых на 3 оторочки каждый; 3 — закачка 0,1 поровых объема горячей воды и 0,1 поровых объема полимера, разбитых на 3 оторочки каждый (концентрация в оторочках раствора полимера, меняется от первой к последней следующим образом: 0,3, 0,6, 1).

Выводы. Разработана методика численного исследования процесса периодического термополимерного воздействия на пласт. Исследовано влияние количества оторочек закачиваемых реагентов, а также соотношения объемов этих оторочек на эффективность вытеснения нефти. В ходе исследования установлено, что: 1) наиболее эффективным является дробление закачиваемых реагентов на 6 чередующихся оторочек; 2) предпочтительным соотношением объемов за-

качиваемых реагентов является равное количество горячей воды и раствора полимера; 3) дробление закачиваемых реагентов на оторочки позволяет сделать задний фронт вытеснения более устойчивым за счет растягивания области увеличения подвижности; 4) изменение концентрации полимера от оторочки к оторочке практически не меняет устойчивости процесса вытеснения нефти. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что технология периодического термополимерного воздействия в целом не дает существенного выигрыша в динамике процесса нефтеизвлечения по сравнению с термополимерным заводнением, но позволяет улучшить соотношение подвижностей флюидов и снизить неустойчивость процесса вытеснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зазовский А.Ф. О неизотермическом вытеснении нефти водой из нетеплоизолированных пластов // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 5. С. 23-44.
2. Зазовский А.Ф., Федоров К.М. О вытеснении нефти паром. М.: Препринт ИПМ АН СССР. № 267. 1986. 82 с.
3. Кудинов В.И., Сучков Б.И. Новые технологии повышения нефтеотдачи. Самара: Изд-во КН. 1998. 368 с.
4. Ентов В.М. Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых средах (математические модели методов повышения нефтеотдачи пластов) // Успехи механики. 1981. Т. 4. № 3. С. 23-56.
5. Ентов В.М. Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых средах (математические модели методов повышения нефтеотдачи пластов) // Успехи механики. 1981. Т. 4. № 3. С. 49-79.

*Константин Михайлович ФЕДОРОВ —
профессор кафедры моделирования
физических процессов и систем,
доктор физико-математических наук*

*Александр Павлович ШЕВЕЛЕВ —
доцент кафедры моделирования
физических процессов и систем,
кандидат физико-математических наук*

*Александр Сергеевич СМИРНОВ —
аспирант кафедры моделирования
физических процессов и систем*

Тюменский государственный университет

УДК 532.546

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ КАРБОНАТНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

АННОТАЦИЯ. Предлагается методика определения оптимальных значений технологических параметров процесса, которая позволяет повысить эффективность и успешность кислотного воздействия на карбонатные коллектора.

The acid treatment of carbonates is considered. The procedure of optimal technological parameters search was developed for the improvement of the process.