

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.*

Солянокислотные обработки (СКО) широко применяются для увеличения проницаемости призабойной зоны пласта в карбонатных коллекторах [1]. Существует многолетний опыт проведения СКО с неоднозначной эффективностью, а также множество технологий, противоречащих друг другу. Процесс взаимодействия кислоты с породой описан на микроуровне (керновый материал) в лабораториях западных университетов. Оптимальным режимом солянокислотной обработки считается тот, при котором в горной породе образуются отдельные каналы — «червоточины», проникающие в глубь призабойной зоны [2]. Этот оптимальный режим описывается безразмерным числом Дамкеллера, который определяется отношением скорости реакции к скорости подвода кислоты. Рассмотрим задачу солянокислотной обработки в рамках двухкомпонентной изотермической фильтрации однофазной несжимаемой жидкости в призабойной зоне скважины в радиальной системе координат согласно уравнению химической реакции:



Составим систему уравнений, включающую уравнения сохранения массы потока реакции (1), массы кислоты (2), массы породы (3) и массы продуктов реакции (4) [3].

$$\frac{\partial m}{\partial t} + r \frac{\partial}{\partial r} (rmv) = -\frac{J}{\rho_i^0} (1 - \chi_2 - \chi_3 - \chi_4); \quad (1)$$

$$\rho_i^0 \frac{\partial C_1 m}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmv \rho_i^0 C_1) = -J; \quad (2)$$

$$\rho_R^0 \frac{\partial (1 - m)}{\partial t} = -\chi_5 J; \quad (3)$$

$$\rho_i^0 \frac{\partial C_2 m}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmv \rho_i^0 C_2) = \chi_2 J, \quad (4)$$

где  $J$  — скорость химической реакции,  $v$  — скорость флюида,  $r$  — радиальная координата,  $m$  — пористость,  $\rho_i^0$  — истинная плотность флюида,  $C_i$  — концентрация реагента,  $t$  — время,  $\chi$  — стехиометрический коэффициент реакции.

Линеаризуем и обезразмерим данную систему уравнений:

$$\frac{\partial m}{\partial T} = \frac{\chi_5 \rho_i^0}{\rho_R^0} Da \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial T} + \frac{\partial C}{\partial X} = -\frac{Da}{m_0} \quad (6)$$

Определим осредненное число Дамкеллера ( $Da$ ):

$$Da = \frac{JV_0}{\rho_i^0 Q} \quad (7)$$

С помощью метода характеристик получим аналитическое решение распределения кислоты (8) и пористости (9) в призабойной зоне скважины:

$$\begin{cases} C(X) = C_0 - \frac{DaX}{m_0}, & \begin{cases} X < \frac{C_0 m_0}{Da} \\ X < 1 \end{cases} \\ C(X) = 0, & \begin{cases} X > \frac{C_0 m_0}{Da} \\ X > 1 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} m^*(r) = m_0 + \frac{\chi_s \rho_l^0}{\rho_R^0} (Da + m_0 C_0 - 2DaX), & \begin{cases} X < \frac{C_0 m_0}{Da} \\ X < 1 \end{cases} \\ m^*(r) = m_0, & \begin{cases} X < \frac{C_0 m_0}{Da} \\ X < 1 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

За эффективность процесса СКО примем отношение дебита жидкости после воздействия к дебиту жидкости до воздействия:

$$Q_{\text{отн}} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_w}\right)}{k_0 \int_{r_w}^{r_c} \frac{dr}{kr}}, \quad (10)$$

где связь проницаемости и пористости определяется формулой Козени-Кармана [4]:

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{m^*}{m_0}\right)^3 \quad (11)$$

Исследуем влияние обратного числа Дамкеллера на эффективность процесса (рис. 1), а также влияние других параметров системы: объем закачки (рис. 2) и начальная концентрация кислоты (рис. 3).

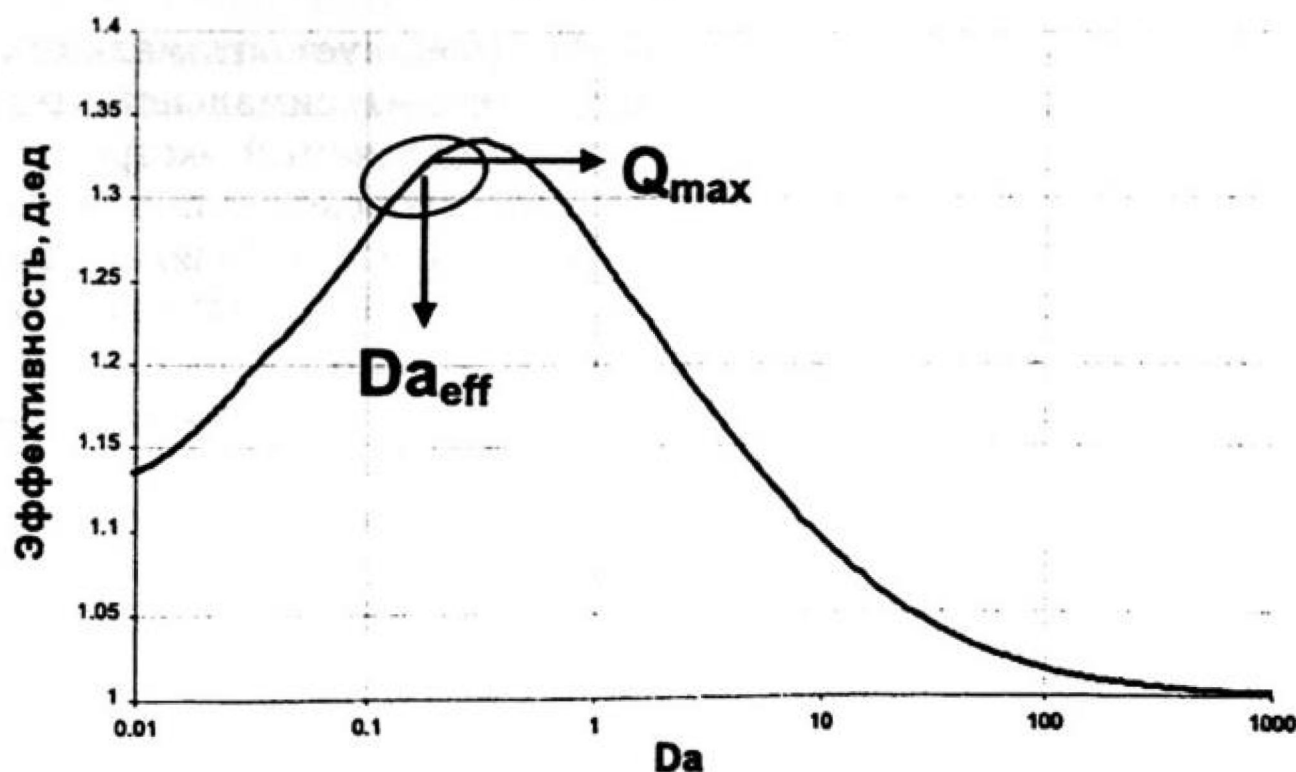


Рис. 1. Зависимость обратной эффективности от обратного числа Дамкеллера



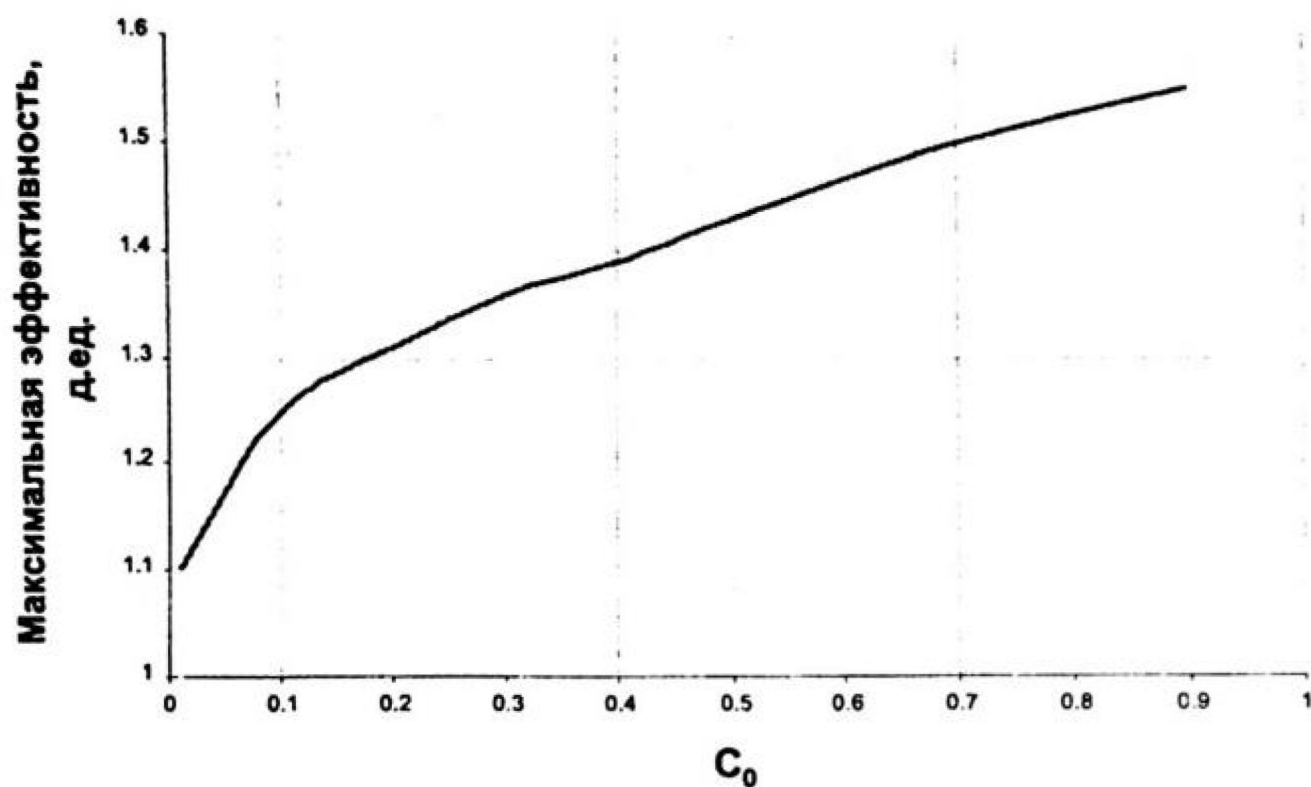


Рис. 2. Зависимость максимальной эффективности от начальной концентрации кислоты

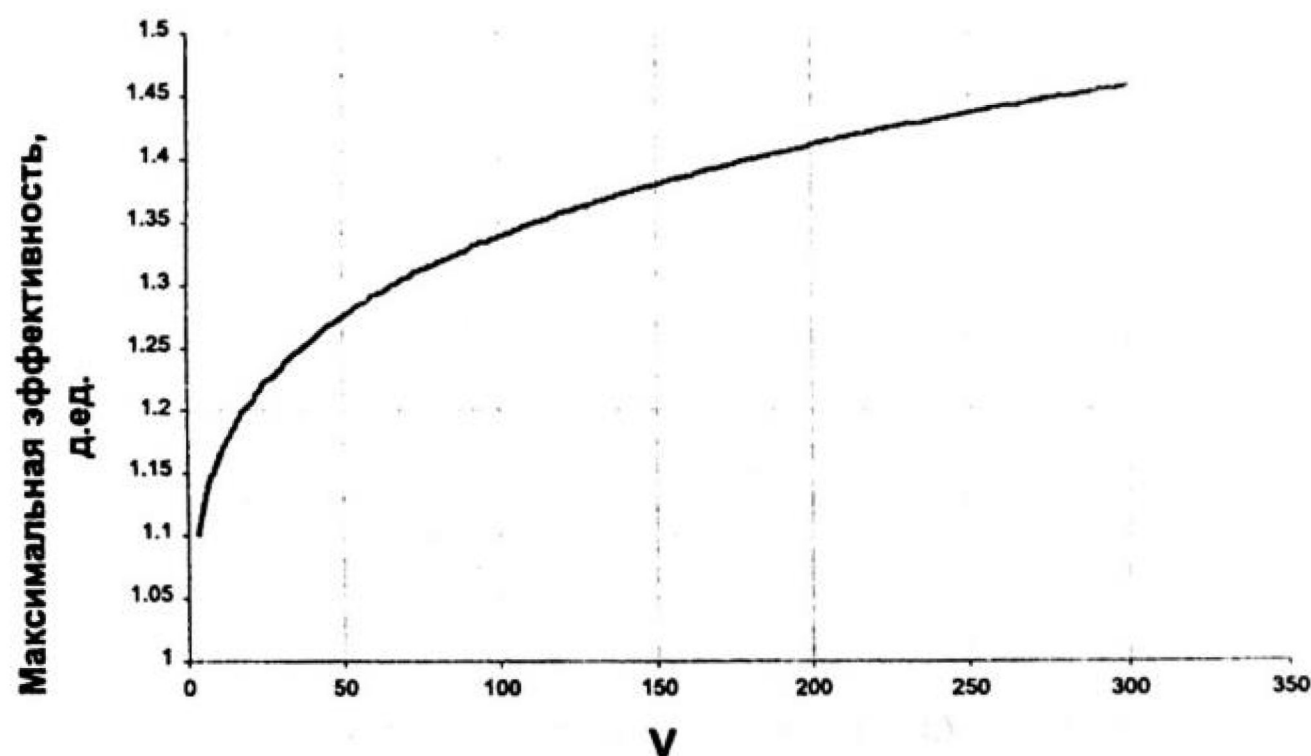


Рис. 3. Зависимость максимальной эффективности от безразмерного объема закачки кислоты

Согласно приведенному графику (рис. 1), существует оптимальный режим закачки реагента в пласт, который позволяет достичь максимальной эффективности процесса (максимального прироста дебита), определяемый экстремумом данной функции. Для данных параметров системы это происходит при значении числа Дамкеллера приблизительно равном 0,26. При малых значениях числа Дамкеллера скорость химической реакции настолько мала по сравнению со скоростью закачки, что кислота начинает реагировать с породой только после окончания закачки. При стремлении числа Дамкеллера к бесконечности эффективность стремится к единице, так как в этом случае скорость реакции превосходит скорость закачки и растворение породы происходит в основном вблизи скважины.

Из рис. 2 и 3 видно, что при увеличении начальной концентрации и объема закачки максимальная эффективность процесса СКО возрастает, что вообще-то очевидно.

Обобщим модель на случай многопластовой залежи. Введем новый критерий эффективности процесса — дисперсия, определяющая отклонение уровня притока жидкости от среднего значения притока, на единицу мощности пласта:

$$D = \frac{1}{n^3} \sum_i^n \left( \sum_i^n \left( \frac{Q_{ik}}{h_i} \right) \frac{\sum_i^n h_i}{Q_k} - \frac{n Q_{ik}}{h_i} \frac{\sum_i^n h_i}{Q_k} \right)^2 \quad (12)$$

Для примера рассмотрим модель залежи, имеющей два пропластка. Рассмотрим два случая. В первом случае эффективно будем воздействовать на первый пропласток: найдем эффективное число  $Da_{1\text{эф}}$  и максимальный прирост  $Q'_1$  для первого пропластка. Затем рассчитаем прирост дебита для второго пропластка  $Q'_2$  при таком же числе  $Da$  (т.е.  $Da_{1\text{эф}} = Da_2$ ). Далее найдем общий прирост  $Q'$  для всего пласта.

Во втором случае проведем ту же самую процедуру при эффективном воздействии на второй пропласток.

Далее для нашего примера вычислим величину дисперсии, используя формулу (12):

$$D_0 = 12.3 \quad D_1 = 14.1 \quad D_2 = 12.9, \quad (13)$$

где  $D_0$  — дисперсия до воздействия кислотой,  $D_{1,2}$  — дисперсия в первом и втором случае соответственно.

Из расчетов видно, что величина дисперсии после обработки кислотой увеличилась в обоих случаях. Получается, что при разработке месторождения с применением заводнения эффективное воздействие на высокопроницаемый пропласток приведет к наиболее быстрому прорыву воды, тогда как при эффективном воздействии на низкопроницаемый пропласток прорыв наступит значительно позже, но при этом будут вовлечены дополнительные запасы нефти, что является благоприятным фактором для разработчиков. Поэтому при проведении солянокислотной обработки следует добиваться уменьшения величины дисперсии.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) число Дамкелера определяет механизм СКО на микро- и макроуровнях; 2) существует оптимальный дизайн СКО при определенных числах Дамкеллера; 3) управлять механизмом СКО можно с помощью изменения начальной концентрации кислоты, применения замедлителей реакции, управления скоростью закачки; 4) дисперсия определяет отклонение уровня притока жидкости от среднего значения притока на единицу мощности пласта; 5) помимо оптимальных чисел Дамкеллера дисперсию следует рассматривать как критерий эффективности выполнения СКО, тем самым добиваясь уменьшения ее величины

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.Е., Котенев Ю.А., Нугайбеков А.Г., Нафиков А.З., Блинов С.А. Повышение эффективности выработки трудноизвлекаемых запасов нефти карбонатных коллекторов. Уч. пособие. Уфа: изд. УГНТУ, 1997. 137 с.
2. Williams B. B. Nierode D. E. Characteristics of acid Reaction in Limestone Formations // SPEJ. 1971 (December) P. 406-18.
3. Федоров К.М. Нестационарная фильтрация при наличии химических реакций с пористой средой. Изв. АН СССР, сер. № 1. МЖГ. 1987. С. 82-87.
4. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1978. 282 с.