

НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Статья поступила в редакцию: 05.08.2026

Статья принята к публикации: 20.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 622.276.5+519.6

Моделирование и оптимизация параметров солянокислотной обработки геологически неоднородных карбонатных коллекторов

Саматов Шерзод Шавкатович

базовый докторант

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID: 0009-0007-2995-6478

E-mail: sh.sh.samatov@gmail.com

Бойкабилова Махлиё Махмудовна

базовый докторант

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID: 0009-0008-7613-8547

E-mail: mahliyoboyqobilova@gmail.com

Modeling and optimization of hydrochloric acid treatment parameters for geologically heterogeneous carbonate reservoirs

Samatov Sherzod Shavkatovich

PhD candidate

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Boyqobilova Mahliyo Makhmudovna

PhD candidate

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Целью исследования является определение эффективной скорости закачки 15 %-ного раствора соляной кислоты в геологически неоднородный карбонатный коллектор. Разработанная реактивно-фильтрационная модель учитывает течение кислотного раствора по закону Дарси, конвективно-дисперсионный перенос HCl, реакцию кислоты с кальцитом, изменение пористости и нелинейную эволюцию проницаемости. Пространственная

Библиографическое описание: Саматов Ш.Ш., Бойкабилова М.М. Моделирование и оптимизация параметров солянокислотной обработки геологически неоднородных карбонатных коллекторов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23328>

неоднородность начальной пористости задана коррелированным случайным полем с коэффициентом вариации $C_v^{\varphi} = 0,10$. Исследованы скорости закачки от 0,01 до 20,0 см/мин. Установлено, что при малых скоростях преобладает поверхностное растворение, а при чрезмерно высоких – объёмное растворение с повышенным расходом кислоты. Наиболее эффективный режим получен при $u_0 = 0,8$ см/мин и числе Дамкёлера $Da = 19,2$. Безразмерный объём кислоты до прорыва составил $PV_{bt} = 3,1$, а отношение макроскопической проницаемости K_{final}/K_0 превысило 120. По сравнению с поверхностным растворением расход кислоты уменьшился на 93,1 %. Предложенный интегральный индекс позволяет совместно оценивать расход реагента и изменение проницаемости. Результаты могут применяться для предварительного выбора режима матричной кислотной обработки с последующей калибровкой по керновым и промысловым данным.

Abstract

The study aims to determine an effective injection rate for a 15 wt.% hydrochloric acid solution in a geologically heterogeneous carbonate reservoir. The developed reactive-transport model incorporates Darcy flow, convective-dispersive HCl transport, acid-calcite reaction, porosity evolution, and nonlinear permeability alteration. The spatial heterogeneity of the initial porosity is represented by a correlated random field with a coefficient of variation of $C_v^{\varphi} = 0.10$. Injection rates ranging from 0.01 to 20.0 cm/min were investigated. At low injection rates, acid was consumed near the inlet, resulting in face dissolution, whereas excessively high rates promoted volumetric dissolution and increased acid consumption. The most effective regime was obtained at $u_0 = 0.8$ cm/min and a Damköhler number of $Da = 19.2$. Under these conditions, the dimensionless acid volume to breakthrough was $PV_{bt} = 3.1$, while the macroscopic permeability ratio K_{final}/K_0 exceeded 120. Compared with the face-dissolution regime, acid consumption decreased by 93.1 %. The proposed integral index enables a combined evaluation of acid consumption and permeability improvement. The results can be applied to the preliminary selection of matrix-acidizing regimes, followed by calibration using core-flooding experiments and field data.

Ключевые слова: карбонатный коллектор, геологическая неоднородность, солянокислотная обработка, реактивная фильтрация, червеобразный канал, число Дамкёлера, оптимизация.

Keywords: carbonate reservoir, geological heterogeneity, hydrochloric acid treatment, reactive transport, wormhole, Damköhler number, optimization.

Введение

Карбонатные коллекторы характеризуются сложной структурой порового пространства, сформированной первичной пористостью, вторичным растворением, доломитизацией, трещиноватостью и кавернозностью. Поэтому распределение кислоты определяется не только средними петрофизическими параметрами, но и пространственной связанностью локальных высокопроницаемых участков [6, 7, 9, 10].

Матричная солянокислотная обработка применяется для снижения фильтрационного сопротивления призабойной зоны карбонатного коллектора. При взаимодействии HCl с минеральной матрицей формируются высокопроницаемые червеобразные каналы. Их морфология зависит от соотношения скоростей химической реакции, конвективного переноса и дисперсии кислоты [2, 4, 5, 9].

При слишком малой скорости закачки кислота расходуется вблизи входной поверхности, вызывая поверхностное растворение. При чрезмерно высокой скорости уменьшается время контакта реагента с породой и усиливается объёмное растворение. В обоих случаях возрастает объём кислоты, необходимый для прорыва. Оптимальный режим обычно формируется в промежуточном диапазоне скоростей [4, 5, 8, 9].

Современные исследования подтверждают, что естественные трещины, неоднородность порового пространства и геометрия фильтрационного потока могут изменять направление каналов, степень их разветвления и величину PV_{bt} [3, 7, 8, 10]. В предыдущей работе с участием авторов рассмотрены результаты кислотной обработки на примере месторождений Матонат и Западный Крук [1]. В настоящем исследовании основное внимание уделено совместной оценке морфологии растворения, расхода кислоты и изменения макроскопической проницаемости.

Цель исследования – определить эффективную скорость закачки 15 %-ного раствора HCl в модели геологически неоднородного карбонатного коллектора.

Материалы и методы

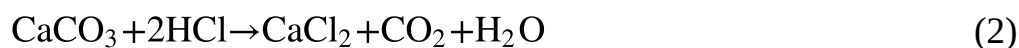
В качестве расчётного объекта принят двумерный фрагмент карбонатного коллектора размером $6,5 \times 3,0$ см. Начальная средняя пористость составляла $\bar{\varphi}_0 = 0,15$, проницаемость – $K_0 = 10$ мД, температура – 80°C . Расчётная область разделена на 260×120 ячеек.

Пространственная неоднородность задавалась коррелированным полем начальной пористости. Степень неоднородности характеризовалась коэффициентом вариации:

$$C_v^\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{\bar{\varphi}_0} \quad (1)$$

При $\sigma_\varphi = 0,015$ и $\bar{\varphi}_0 = 0,15$ получено $C_v^\varphi = 0,10$, что соответствует умеренной неоднородности.

Реакция HCl с кальцитом описывалась уравнением:



Движение кислотного раствора определялось законом Дарси:

$$u = \frac{K(\varphi)}{\mu} \nabla p, \quad (3)$$

где u – скорость фильтрации; $K(\varphi)$ – текущая проницаемость; μ – динамическая вязкость раствора; p – давление.

Перенос и расходование кислоты описывались уравнением [5, 6, 9]:

$$\frac{\partial(\varphi C^f)}{\partial t} + \nabla \cdot (u C^f) \nabla \cdot (\varphi D_e \nabla C^f) k_{\text{eff}} a_v C^f, \quad (4)$$

где C^f – концентрация HCl; D_e – коэффициент дисперсии; k_{eff} – эффективный коэффициент реакции; a_v – удельная реакционная поверхность.

Изменение пористости вследствие растворения кальцита рассчитывалось как:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \cdot \frac{\alpha M_{\text{CaCO}_3}}{\rho_s} k_{\text{eff}} a_v C^f, \quad (5)$$

где $\alpha = 0,5$ моль CaCO_3 /моль HCl; M_{CaCO_3} – молярная масса кальцита; ρ_s – плотность минеральной матрицы.

Проницаемость пересчитывалась по модифицированной зависимости Кармана-Козени:

$$\frac{K(\varphi)}{K_0} \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 \left(\frac{1-\varphi_0}{1-\varphi} \right)^2 \quad (6)$$

На входной границе задавались скорость закачки u_0 и постоянная концентрация кислоты. На выходной границе принималось постоянное давление, а на боковых границах – отсутствие нормального потока. Момент прорыва определялся при достижении кислотой выходной границы модели.

Число Дамкёлера и безразмерный объём кислоты до прорыва определялись выражениями:

$$Da = \frac{k_{\text{eff}} a_0 L}{u_0}; PV_{bt} = \frac{u_0 t_{bt}}{\varphi_0 L} \quad (7)$$

Для совместной оценки расхода кислоты и фильтрационного результата использован индекс:

Таблица 1.

Параметры базовой модели

Параметр	Обозначение	Значение
Размер модели, см	$L \times B$	6,5×3,0
Расчётная сетка	–	260×120
Средняя пористость	$\bar{\varphi}_0$	0,15
Коэффициент вариации	C_v^{φ}	0,10
Начальная проницаемость, мД	K_0	10
Концентрация HCl, масс. %	C_0	15
Температура, °C	T	80
Вязкость раствора, мПа·с	μ	1,2
Коэффициент реакции, м/с	k_{eff}	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Удельная поверхность, 1/м	a_0	$2,46 \cdot 10^4$

Расчёты выполнены при скоростях закачки 0,01; 0,10; 0,80; 2,00; 5,00 и 20,00 см/мин.

Результаты и обсуждение

При изменении скорости закачки выявлены пять режимов: поверхностное растворение, конусообразные каналы, доминирующий канал, разветвлённые каналы и объёмное растворение (Рис.1). Последовательность режимов определяется изменением соотношения между скоростью реакции и переносом кислоты [2, 4 – 6, 9].

При $u_0 = 0,01$ см/мин и $Da = 1540,5$ реакция значительно преобладала над переносом. Кислота расходовалась у входной границы, поэтому $PV_{bt} = 45,2$, а проницаемость увеличилась только в 1,2 раза.

При скорости 0,10 см/мин кислота проникала глубже, однако растворение ограничивалось короткими конусообразными каналами. Значение PV_{bt} снизилось до 18,5, а K_{final}/K_0 увеличилось до 8,5.

Наиболее эффективный режим получен при $u_0 = 0,8$ см/мин и $Da = 19,2$. В этом случае сформировался один доминирующий канал, пересекающий расчётную область. Локальный рост проницаемости усиливал приток кислоты, что ускоряло дальнейшее растворение. Значение PV_{bt} уменьшилось до 3,1, а K_{final}/K_0 превысило 120 (Табл.2)

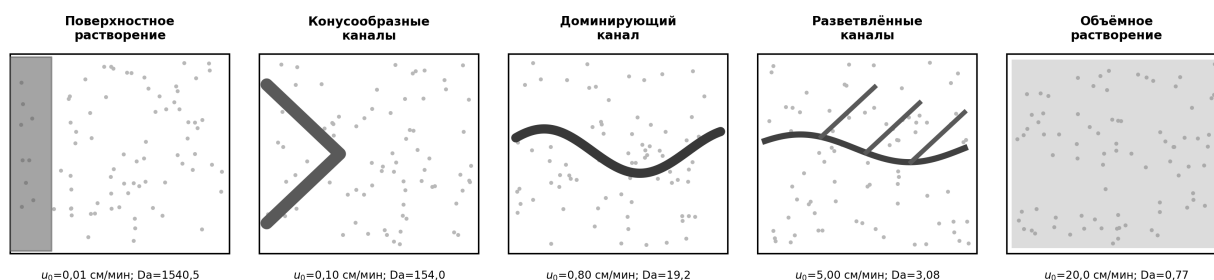


Рисунок 1. Режимы растворения при различных скоростях закачки HCl

Таблица 2.

Результаты расчётов при различных скоростях закачки HCl

u_0 , см/мин	Da	PV_{bt}	Режим растворения	K_{final}/K_0	I_e
0,01	1540,50	45,2	Поверхностное	1,2	0,00
0,10	154,00	18,5	Конусообразные каналы	8,5	0,41
0,80	19,20	3,1	Доминирующий канал	>120,0	>38,39
2,00	7,70	5,2	Частично разветвлённые	85,4	16,23
5,00	3,08	7,8	Разветвлённые каналы	45,3	5,68
20,00	0,77	22,4	Объёмное растворение	5,1	0,18

По сравнению с поверхностным растворением относительное уменьшение расхода кислоты составило:

$$\frac{45,2 - 3,1}{45,2} \cdot 100\% = 93,1\%.$$

При увеличении скорости до 2,0 и 5,0 см/мин поток распределялся между несколькими ответвлениями, вследствие чего PV_{bt} возросло соответственно до 5,2 и 7,8. При 20,0 см/мин значение $Da = 0,77$ указывало на преобладание конвекции. Устойчивый селективный канал не формировался, а PV_{bt} увеличилось до 22,4

Зависимость PV_{bt} от скорости закачки имеет U-образный характер. Минимум PV_{bt} , максимум K_{final}/K_0 и наибольшее значение I_e соответствуют скорости 0,8 см/мин. Индекс $I_e > 38,39$ в данном режиме более чем в 2,36 раза превышает показатель варианта при 2,0 см/мин (Рис.2).

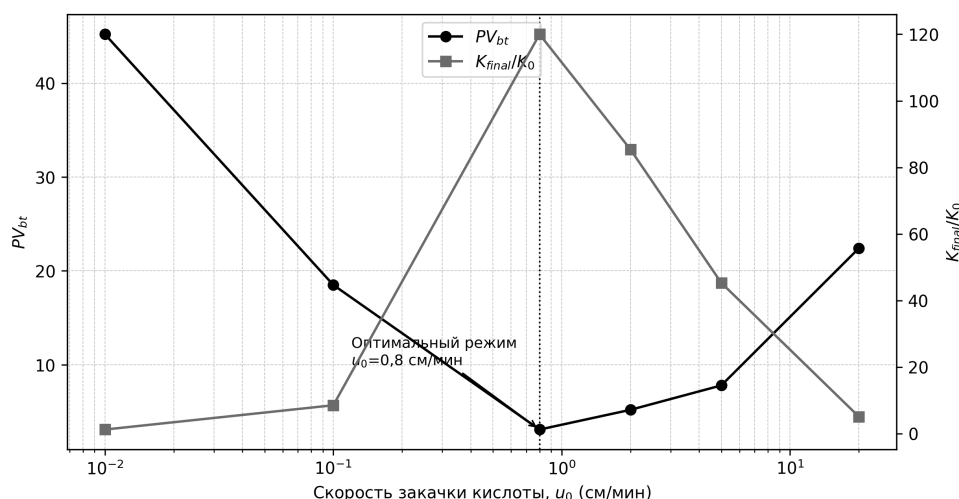


Рисунок 2. Зависимость PV_{bt} и K_{final}/K_0 от скорости закачки HCl

Полученный оптимум относится только к принятой модели: 15 %-ному HCl, температуре 80 °С, пористости 0,15, проницаемости 10 мД и $C_v^p = 0,10$. При изменении температуры, минералогического состава, концентрации кислоты или геологической неоднородности оптимальная скорость может сместиться [3, 7, 8, 10].

Промысловое сопоставление по скважинам Матонат-24 и Западный Крук-85 показало увеличение исходных показателей дебита соответственно на 41,6 и 99,6 % [1]. Эти данные подтверждают практическую направленность метода, но не являются прямой верификацией модели, поскольку сведения о минералогическом составе, объеме кислоты, графике закачки и начальном скин-факторе представлены не в полностью сопоставимом виде.

Основными ограничениями исследования являются использование одной реализации неоднородного поля, одной концентрации HCl и двумерной геометрии. Модель не учитывает отдельное движение CO_2 , механическую деформацию породы и тепловой эффект реакции.

Заключение

1. Скорость закачки HCl определяет соотношение между реакцией и переносом кислоты и влияет на морфологию растворения карбонатного коллектора.
2. При малых скоростях наблюдается поверхностное растворение, а при чрезмерно высоких – объемное растворение с повышенным расходом кислоты.
3. Для модели с $C_v^p = 0,10$, $\varphi_0 = 0,15$, $K_0 = 10$ мД, температурой 80 °С и 15 %-ным HCl наиболее эффективный режим получен при $u_0 = 0,8$ см/мин и $Da = 19,2$.

4. В оптимальном режиме $PV_{bt} = 3,1$, а $K_{final}/K_0 > 120$. По сравнению с поверхностным растворением расход кислоты уменьшился на 93,1 %.

5. Предложенный индекс I_e позволяет совместно оценивать расход кислоты и изменение проницаемости. Перед применением результатов к конкретной скважине модель должна быть откалибрована по керновым и промысловым данным.

Список литературы

1. Эрматов Н.Х., Саматов Ш.Ш., Бойкабилова М.М., Ахатова Г.А. Karbonat kollektorlarga kislotali ishlov berishni modellashtirish (Matonat va G'arbiy Kruk konlari misolida) // Innovatsion texnologiyalar. – 2025. – № 3. – P. 7–15.
2. Buijse M.A., Glasbergen G. A Semi-Empirical Model to Calculate Wormhole Growth in Carbonate Acidizing // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – 2005. – DOI: 10.2118/96892-MS.
3. Dudun A., Feng Y. Numerical Simulation of Wormhole Propagation in Fractured Carbonate Rocks During Acidizing Using a Simplified Stokes-Brinkman Model // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2024. – DOI: 10.1007/s13202-024-01857-w.
4. Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of Transport and Reaction on Wormhole Formation in Porous Media // AIChE Journal. – 1949. – № 9. – DOI: 10.1002/aic.690440902.
5. Kalia N., Balakotaiah V. Modeling and Analysis of Wormhole Formation in Reactive Dissolution of Carbonate Rocks // Chemical Engineering Science. – 2007. – № 4. – DOI: 10.1016/j.ces.2006.10.021.
6. Kalia N., Balakotaiah V. Effect of Medium Heterogeneities on Reactive Dissolution of Carbonates // Chemical Engineering Science. – 2009. – № 2. – DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.026.
7. Liu P., Kong X., Feng G., Zhang K., Sun S., Yao J. Three-Dimensional Simulation of Wormhole Propagation in Fractured-Vuggy Carbonate Rocks During Acidization // Advances in Geo-Energy Research. – 2023. – № 3. – DOI: 10.46690/ager.2023.03.06.
8. Lucas C.R. dos Santos, Neyra J.R., Araújo E.A., da Silva D.N.N., Lima M.A., Ribeiro D.A.M., Aum P.T.P. Carbonate Acidizing: A Review on Influencing Parameters of Wormholes Formation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111168.
9. Panga M.K.R., Ziauddin M., Balakotaiah V. Two-Scale Continuum Model for Simulation of Wormholes in Carbonate Acidization // AIChE Journal. – 2005. – № 12. – DOI: 10.1002/aic.10574.
10. Yang G., Wu X., Hou J., Nie F. Study on the Influence of Heterogeneity of Low-Permeability Reservoirs on Wormhole Morphology and Acidizing Process Parameters // Processes. – 2024. – № 12. – DOI: 10.3390/pr12122740.

References

1. Ermatov N.Kh., Samatov Sh.Sh., Boykobilova M.M., Akhatova G.A. [Modeling Acid Treatment of Carbonate Reservoirs: A Case Study of the Matonat and Western Kruk Fields] // *Innovatsion tekhnologiyalar.* – 2025. – № 3.
2. Buijse M.A., Glasbergen G. A Semi-Empirical Model to Calculate Wormhole Growth in Carbonate Acidizing // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* – 2005. – DOI: 10.2118/96892-MS.
3. Dudun A., Feng Y. Numerical Simulation of Wormhole Propagation in Fractured Carbonate Rocks During Acidizing Using a Simplified Stokes-Brinkman Model // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology.* – 2024. – DOI: 10.1007/s13202-024-01857-w.
4. Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of Transport and Reaction on Wormhole Formation in Porous Media // *AIChE Journal.* – 1949. – № 9. – DOI: 10.1002/aic.690440902.
5. Kalia N., Balakotaiah V. Modeling and Analysis of Wormhole Formation in Reactive Dissolution of Carbonate Rocks // *Chemical Engineering Science.* – 2007. – № 4. – DOI: 10.1016/j.ces.2006.10.021.
6. Kalia N., Balakotaiah V. Effect of Medium Heterogeneities on Reactive Dissolution of Carbonates // *Chemical Engineering Science.* – 2009. – № 2. – DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.026.
7. Liu P., Kong X., Feng G., Zhang K., Sun S., Yao J. Three-Dimensional Simulation of Wormhole Propagation in Fractured-Vuggy Carbonate Rocks During Acidization // *Advances in Geo-Energy Research.* – 2023. – № 3. – DOI: 10.46690/ager.2023.03.06.
8. Lucas C.R. dos Santos, Neyra J.R., Araújo E.A., da Silva D.N.N., Lima M.A., Ribeiro D.A.M., Aum P.T.P. Carbonate Acidizing: A Review on Influencing Parameters of Wormholes Formation // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* – 2023. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111168.
9. Panga M.K.R., Ziauddin M., Balakotaiah V. Two-Scale Continuum Model for Simulation of Wormholes in Carbonate Acidization // *AIChE Journal.* – 2005. – № 12. – DOI: 10.1002/aic.10574.
10. Yang G., Wu X., Hou J., Nie F. Study on the Influence of Heterogeneity of Low-Permeability Reservoirs on Wormhole Morphology and Acidizing Process Parameters // *Processes.* – 2024. – № 12. – DOI: 10.3390/pr12122740.