Добыча полезных ископаемых

DOI: 10.35634/UdSU.2026.47.22.015

УДК 622.276

И.Ю. Чирков, С.Ю. Борхович, Н.Г. Истомина, Р.Г. Латыпов

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. В статье представлена методика проектирования кислотных обработок призабойной зоны скважин, эксплуатирующих карбонатные коллекторы. Подход основан на интеграции результатов фильтрационных экспериментов, кинетических исследований и эмпирического моделирования. Особое внимание уделено анализу влияния неоднородности порового пространства и степени обводнённости на формирование каналов растворения. Предложен критериальный подход к определению оптимальных параметров закачки кислотных составов. Полученные результаты демонстрируют возможность повышения технологической эффективности воздействий при одновременном снижении доли нерезультативных операций.

Ключевые слова: кислотная обработка, карбонатный коллектор, призабойная зона, фильтрация, кинетика реакции, обводнённость, проницаемость, моделирование.

Для цитирования: Моделирование кислотных обработок карбонатных коллекторов на основе фильтрационно-кинетических исследований / И.Ю. Чирков, С.Ю. Борхович, Н.Г. Истомина, Р.Г. Латыпов // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т.9. Вып.2. С. 514–524. DOI: 10.35634/UdSU.2026.47.22.015

Введение

В условиях истощения традиционных запасов углеводородов возрастает значимость методов интенсификации добычи, ориентированных на повышение коэффициента извлечения нефти. Одним из наиболее распространённых технологических приёмов является кислотное воздействие на карбонатные коллекторы, обеспечивающее увеличение фильтрационных характеристик призабойной зоны.

Тем не менее, несмотря на многолетнюю практику применения, эффективность кислотных обработок остаётся нестабильной. Это обусловлено

сложным сочетанием геолого-физических факторов, включая литологическую неоднородность, вариативность поровой структуры и высокий уровень обводнённости.

В связи с этим актуальной задачей является разработка научно обоснованных подходов к проектированию кислотных воздействий, учитывающих совокупность фильтрационных и кинетических процессов [1-5].

Объект и методы исследования

Объектом исследования выступают карбонатные отложения башкирского яруса месторождений Удмуртской Республики, характеризующиеся выраженной микронеоднородностью.

Экспериментальная база

Для воспроизведения пластовых условий использовались составные керновые модели, сформированные из натуральных образцов пород. Длина моделей варьировалась в диапазоне 0,09–0,15 м, что обеспечивало адекватное моделирование фильтрационных процессов.

Фильтрационные эксперименты проводились при условиях:

-давление: 10–12 МПа;

-температура: 25–35 °С.

В качестве рабочих флюидов применялись пластовая нефть и минерализованная вода.

Схемы проведения экспериментов представлены на рис.1.

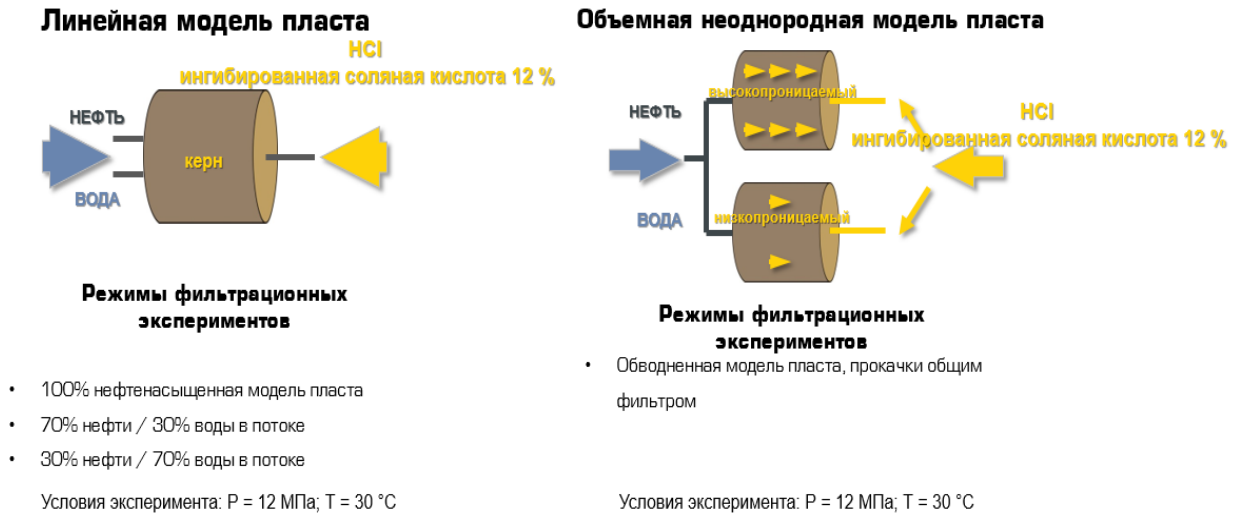


Рис. 1. Схемы проведения фильтрационных экспериментов

Экспериментальная программа включала:

-линейные модели пласта;

-модели с различной насыщенностью (нефть/вода);

-объёмные неоднородные модели.

Результаты и их анализ

Влияние гидродинамического режима.

Анализ экспериментальных данных показал, что характер взаимодействия кислотного состава с породой определяется соотношением скорости фильтрации и скорости химической реакции.

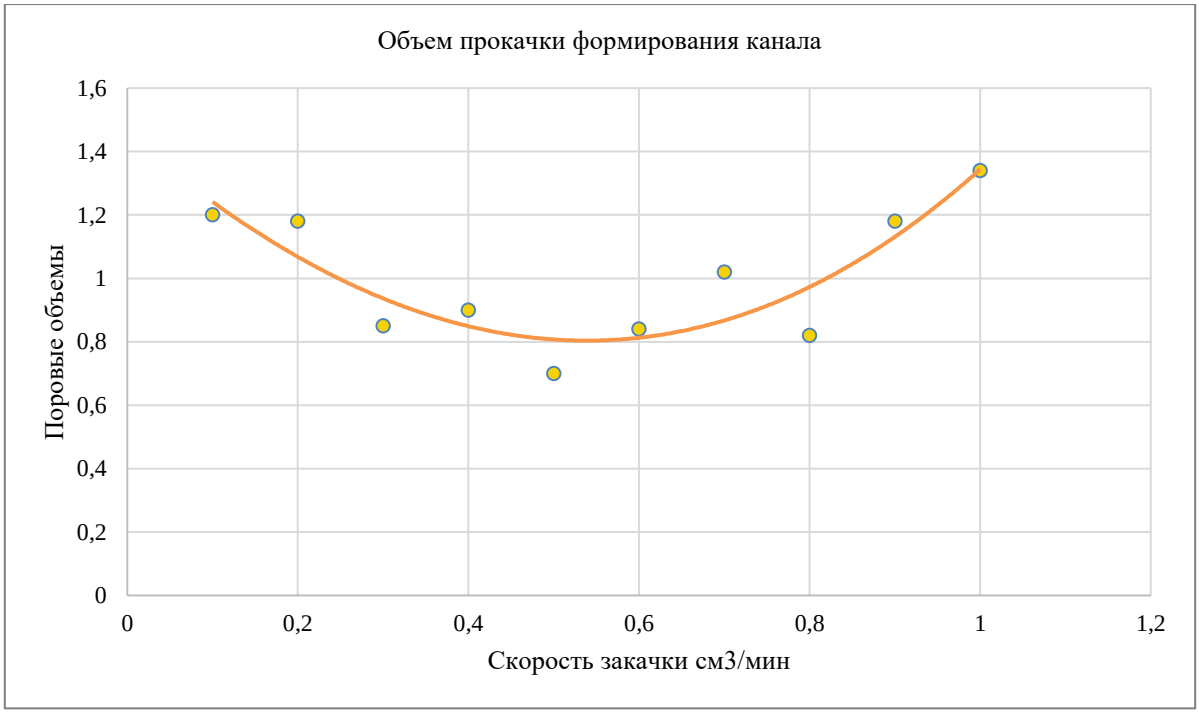


Рис. 2. Зависимость объёма прокачки до формирования канала растворения от скорости закачки

Установлено, что при сниженных скоростях реализуется диффузионно-контролируемый режим растворения, тогда как при увеличении расхода формируются локализованные каналы высокой проводимости.

Оптимальный диапазон скоростей закачки составляет 0,4–0,6 см³/мин, что соответствует условиям формирования устойчивых каналов растворения значительной протяжённости.

Таблица 1

Влияние фазовой структуры потока

Фильтрационная модель	Тип коллектора														
	Поровый коллектор, РИПы					Поровый коллектор, низкопроницаемый					Каверно-трещиновато-поровый коллектор				
	Фазовая проницаемость				Кн/Кв	Фазовая проницаемость				Кн/Кв	Фазовая проницаемость				Кн/Кв
	по нефти / воде, 10^{-3}*мкм^2				до обр./ после обр.	по нефти / воде, 10^{-3}*мкм^2				до обр./ после обр.	по нефти / воде, 10^{-3}*мкм^2				до обр./ после обр.
	до обработки		после обработки			до обработки		после обработки			до обработки		после обработки		
	нефть	вода	нефть	вода		нефть	вода	нефть	вода		нефть	вода	нефть	вода	
Линейная модель пласта, 100% нефтенасыщен-ность	24,7	-	429,6	-		1,33	-	23,95	-		32,12	-	195,32	-	
Линейная модель пласта, 70% нефти / 30% воды в потоке	2,89	0,56	319	11,24	5,16 / 28,38	0,56	0,11	23,17	6,22	41,4 / 56,5	34,22	5,33	256,18	75,33	7,5 / 14,1
Линейная модель пласта, 30% нефти / 70% воды в потоке	1,45	0,45	26,1	6,39	3,22 / 4,08	0,33	0,07	5,3	1,95	16,1 / 27,9	12,23	1,58	129	18,03	10,5 / 11,4

Экспериментально установлено, что увеличение доли водной фазы приводит к существенной деградации эффективности кислотного воздействия. Это обусловлено:

-перераспределением потоков в сторону водонасыщенных зон;

-снижением времени контакта кислоты с породой;

-преждевременным прорывом реагента.

При обводнённости свыше 70% эффективность обработки носит ограниченный характер.

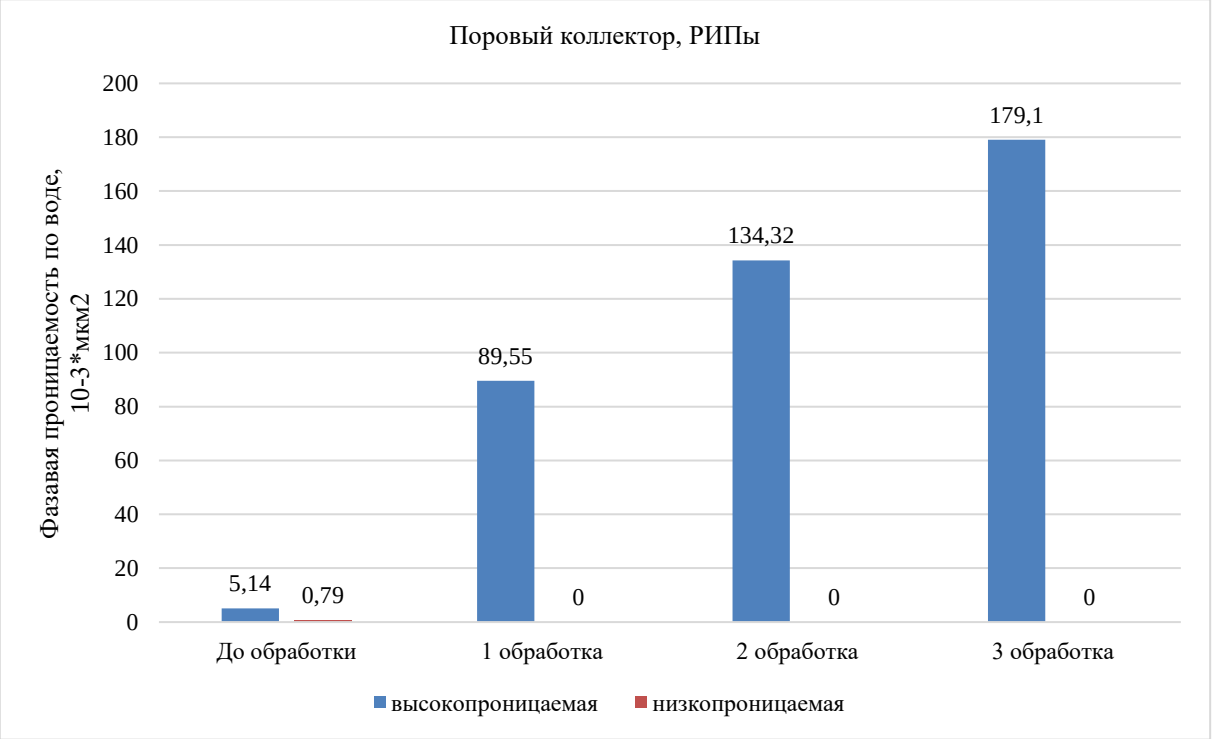


Рис. 3. Влияние неоднородности коллекторов на фазовую проницаемость

Проведённые исследования показали, что в условиях контрастной проницаемости наблюдается преимущественная фильтрация через высокопроницаемые зоны, что приводит к эффекту «шунтирования» и исключению низкопроницаемых интервалов из процесса воздействия.

Это обстоятельство существенно снижает охват пласта и требует применения селективных технологий.

Кинетика взаимодействия кислоты с породой.

Кинетические параметры реакции, изучающие скорость и характер протекания химических реакций между кислотой и породой, определялись с использованием манометрических методов. Полученные значения констант

скорости позволили перейти к безразмерному описанию процесса на основе числа Дамкёлера [6-8].

Введён обобщённый критерий Дамкёлера:

$$N_{Da} = \frac{\pi dlk}{Q},$$

где k – общая константа скорости реакции, см/мин; Q – расход кислотного состава, $см^3$/мин; l – длина канала растворения, см; d – диаметр канала растворения, см

Оптимальный диапазон значений составляет:

$$D_a = 0{,}3–0{,}5$$

Данный интервал соответствует режиму, при котором обеспечивается баланс между скоростью химического взаимодействия и скоростью прокачки агента.

Слишком низкое D_a (медленная реакция / высокая скорость закачки):

- кислота не успевает вступить в реакцию вблизи забоя;

- формируется множество коротких, разветвлённых каналов;

- глубина проникновения кислоты высока, но эффективность воздействия на пласт низка.

Слишком высокое D_a (быстрая реакция / низкая скорость закачки):

- реакция идёт преимущественно в ближней зоне пласта;

- образуется один крупный канал без разветвлений;

- значительная часть кислоты расходуется неэффективно, не достигая удалённых зон.

Обсуждение результатов

Полученные данные подтверждают, что эффективность кислотных обработок определяется совокупностью взаимосвязанных факторов, среди которых ключевую роль играют:

-гидродинамические условия закачки (рис. 2);

-неоднородность коллектора (рис. 3);

-фазовое состояние флюидов (табл. 1).

Заключение

В результате выполненных исследований:

1. Установлены зависимости формирования каналов растворения в карбонатных коллекторах.

2. Определен оптимальный диапазон числа Дамкёлера для закачки кислотных составов.

3. Выявлено критическое влияние обводнённости на эффективность воздействия, которое составило 70%.

4. Разработан критериальный подход к оценке результативности кислотных обработок и подбору кандидатов (скорость закачки, неоднородность коллектора, фазовое состояние флюида).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насибулин И.М., Мисолина Н.А., Баймашев Б.А. Современные представления о влиянии геологических факторов, определяющих процесс взаимодействия кислотных растворов с карбонатной породой // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. №3. С.56 – 61
2. Подбор эффективных кислотных составов для обработки призабойных зон скважин в карбонатных коллекторах / Г.И. Васясин [и др.] // Нефтепромысловое дело. 2009. №4 С. 17 – 21 .
3. Интенсификация добычи нефти из карбонатных коллекторов / Р.М. Тухтеев [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2002, № 4 С.68 – 70.
4. Сучков Б.М. Добыча нефти из карбонатных коллекторов. М.: Изд. «РХД», 2005. 688 с.
5. Разработка дизайна кислотных обработок карбонатных пластов месторождений удмуртии на основе комплекса исследований / И.Ю. Чирков [и др.] // Сборник трудов VIII

Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием. Москва, 2025

6. Wang, Y., Hill, A.D. and Schechter, R.S.: "The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing Carbonate Formations"//SPE 26578. 1993.
7. Bazin B., Bieber M.T., Roque C, Bouteca, "Improvement in the Characterization of the Acid Wormholing by 'InSitu' X-Ray CT Visualizations", SPE 31073, Moscow, 1996.
8. Fredd, C.N., Tjia, R. and Fogler, H.S.: "The Existence of an Optimum Damkohler Number for Matrix Stimulation of Carbonate Formations", paper SPE 38167, 1997.

Поступила в редакцию: 27.04.26

Сведения об авторах

Чирков И.Ю.
студент 5 курса специалитета, Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, Россия. E-mail: 555igorgr@gmail.com

Борхович Сергей Юрьевич
к.т.н., доцент кафедры РЭНГМ, Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, Россия. E-mail: syborhovich@yandex.ru

Истомина Наталья Григорьевна
доцент кафедры РЭНГМ, Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, Россия. E-mail: nf-ing@udsu.ru

Латыпов Ринат Гаязович
доцент кафедры РЭНГМ, Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, Россия. E-mail: rinat.latyipov@yandex.ru

I.Yu. Chirkov, S.Yu. Borkhovich, N.G. Istomina, R.G. Latypov

MODELING OF ACID TREATMENTS OF CARBONATE RESERVOIRS BASED ON FILTRATION-KINETIC STUDIES

Annotation. The article presents a methodology for designing acid treatments in the bottomhole zone of wells producing from carbonate reservoirs. The approach is based on the integration of results from filtration experiments, kinetic studies, and empirical modeling. Particular attention is paid to analyzing the influence of pore space heterogeneity and water cut on the formation of dissolution channels. A criteria-based approach is proposed for determining the optimal parameters for injecting acid compositions. The obtained results demonstrate the possibility of increasing the technological efficiency of treatments while simultaneously reducing the proportion of ineffective operations.
Keywords: acid treatment, carbonate reservoir, bottomhole zone, filtration, reaction kinetics, water cut, permeability, modeling.

For citation: Chirkov I.Yu., Borkhovich S.Yu., Istomina N.G., Latypov R.G. [Modeling of acid treatments of carbonate reservoirs based on filtration-kinetic studies] *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 2, pp. 514–524. DOI: 10.35634/UdSU.2026.47.22.015. (In Russ.).

REFERENCES

1. Nasibulin I.M., Misolina N.A., Baimashev B.A. Sovremennye predstavleniya o vliyanii geologicheskikh faktorov, opredelyayushchikh protsess vzaimodeistviya kislotnykh rastvorov s karbonatnoi porodoi [Modern concepts of the influence of geological factors determining the process of interaction of acid solutions with carbonate rock]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* [*Geology, geophysics and development of oil and gas fields*]. 2011, no. 3, pp. 56 – 61. (In Russ.).
2. Vasyasin G.I. et al. Podbor ehffektivnykh kislotnykh sostavov dlya obrabotki prizaboinykh zon skvazhin v karbonatnykh kollektorakh [Selection of effective acid compositions for the treatment of bottom-hole zones of wells in carbonate reservoirs]. *Neftepromyslovoe delo.* [*Oilfield business*]. 2009, no. 4, pp. 17 – 21. (In Russ.).
3. Tukhteev R.M. et al. Intensifikatsiya dobychi nefti iz karbonatnykh kollektorov [Intensification of oil production from carbonate reservoirs]. *Neftyanoe khozyaistvo* [*Oil industry*]. 2002, no. 4, pp .68 – 70. (In Russ.).
4. Suchkov B.M. *Dobycha nefti iz karbonatnykh kollektorov* [Extraction of oil from carbonate reservoirs]. Moscow: Publ., «RKHD», 2005, 688 p. (In Russ.).

5. Chirkov I.Yu. et al. Razrabotka dizaina kislotnykh obrabotok karbonatnykh plastov mestorozhdenii udmurtii na osnove kompleksa issledovanii [Development of the design of acid treatments of carbonate formations of Udmurtia deposits based on a set of studies]. *Sbornik trudov VIII Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [*Proceedings of the VIII All-Russian Youth Scientific Conference with international participation*]. Moscow, 2025. (In Russ.).
6. Wang, Y., Hill, A.D. and Schechter, R.S.: "The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing Carbonate Formations", SPE 26578, 1993.
7. Bazin B., Bieber M.T., Roque C, Bouteca, "Improvement in the Characterization of the Acid Wormholing by 'InSitu' X-Ray CT Visualizations", SPE 31073, Moscow, 1996.
8. Fredd C.N., Tjia R. and Fogler H.S.: "The Existence of an Optimum Damkohler Number for Matrix Stimulation of Carbonate Formations", paper SPE 38167, 1997.

Received: 27.04.26

About the Author

Chirkov I.Y.
5th year student of the specialty, M.S. Gutseriev Institute of Oil and Gas, Udmurt State University, 426034, Izhevsk, Universitetskaya str., 1, Russia.
E-mail: 555igorgr@gmail.com

Borkhovich Sergey Yuryevich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Russian Chemical Engineering, M.S. Gutseriev Institute of Oil and Gas, Udmurt State University, Universitetskaya str., 1, Izhevsk, 426034, Russia. E-mail: syborhovich@yandex.ru

Istomina Natalia Grigorievna
Associate Professor of the Department of Russian Chemical Engineering, M.S. Gutseriev Institute of Oil and Gas, Udmurt State University, Universitetskaya str., 1, Izhevsk, 426034, Russia.
E-mail: nf-ing@udsu.ru

Latypov Rinat Gayazovich
Associate Professor of the Department of Russian Chemical Engineering, M.S. Gutseriev Institute of Oil and Gas, Udmurt State University, Universitetskaya str., 1, Izhevsk, 426034, Russia.
E-mail: rinat.latyipov@yandex.ru