

УДК 622.276.63

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕАКЦИИ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ С КАРБОНАТНЫМИ ПОРОДАМИ ПРИ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПЛАСТА

© 2025 г. Р. М. Ганопольский^{а, *}, Б. Р. Гильмутдинов^б, А. В. Жонин^с, Т. М. Мухаметзянов^с,
К. М. Федоров^{а, **}, А. Е. Фоломеев^б

^аФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия

^бООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, Россия

^сООО «АЛТИМ», Уфа, Республика Башкортостан, Россия

*e-mail: r.m.ganopolskij@utmn.ru

**e-mail: k.m.fedorov@utmn.ru

Поступила в редакцию 16.10.2024

После доработки 27.03.2025

Принята в печать 02.04.2025

Взаимодействие кислоты с карбонатными породами является основой процессов повышения продуктивности добывающих скважин и интенсификации добычи нефти из карбонатных коллекторов. Растворение карбонатов в условиях фильтрации раствора кислоты через пористую среду определяется конкуренцией процессов химической реакции и конвективного переноса кислоты. Исследование этих конкурирующих процессов проводится на двух основных установках: вращающемся карбонатном диске, омываемом потоком кислоты, и установке по фильтрации раствора кислоты через образцы карбонатного коллектора. В работе представлены результаты таких исследований с обсуждением и определением параметров кинетики реакции на образце конкретного месторождения. Рассчитаны значения диффузии и кинетики реакции, критической скорости образования червоточин в пористой среде при различных концентрациях соляной кислоты. Оценены значения основных безразмерных комплексов подобия: чисел Дамкелера, Пекле и растворяющей способности кислоты.

Ключевые слова: кислотная обработка карбонатов, червоточины, диффузия, вращающийся диск

DOI: 10.31857/S0040357125020101 **EDN:** ndvyax

ВВЕДЕНИЕ

В основе многих технологических процессов лежит взаимодействие растворителя с пористой матрицей растворяющегося вещества. В дальнейшем такой процесс будет рассматриваться на примере взаимодействия водного раствора соляной кислоты с карбонатной пористой породой. Этот процесс составляет основу распространенного геолого-технического мероприятия по увеличению проницаемости карбонатного коллектора и повышению коэффициента продуктивности добывающих нефтяных скважин [1, 2]. Растворение карбонатной породы кислотой является конкурирующим процессом кинетики растворения и конвективного переноса кислоты в пористой среде. В зависимости от скорости фильтрации или конвективного переноса возможны следующие режимы выщелачивания: фронтального растворения матрицы с образо-

ванием каверны в области закачки кислоты при малых скоростях фильтрации; объемного режима растворения, когда скорость реакции преобладает над конвективным переносом; формирования червоточин — каналов с миллиметровым диаметром при промежуточных или критических скоростях переноса кислоты [3]. Наиболее эффективным с точки зрения повышения коэффициента продуктивности скважин является режим с формированием червоточин, при одинаковых объемах закачки кислоты червоточины наиболее глубоко проникают в пористый коллектор и максимально повышают проницаемость матрицы и коэффициента продуктивности скважины в целом.

Исследование процесса взаимодействия кислоты с карбонатным коллектором проводят с использованием разных методов для изучения параметров кинетики процесса [4], а также пара-

метров фильтрации кислотных составов на образцах керна при термобарических условиях пласта [4, 5]. Это позволяет определить оптимальное соотношение скорости реакции кислотных составов с породой и скорости закачки их в пласт, а также прогнозировать продуктивности скважин после воздействия. Для этого изучается скорость взаимодействия кислотных составов с породой различными методами и исследуется фильтрация кислоты в пористой среде с использованием образцов керна породы исследуемого объекта. Существует множество способов определения кинетических параметров взаимодействия карбоната кальция и соляной кислоты: метод диафрагменной ячейки [6], с использованием образцов мрамора [7], метод вращающегося диска [2], метод определения скорости газовыделения [8, 9]. Все методы основаны на фиксировании количества/массы прореагировавшего вещества или образовавшихся продуктов реакции. Все методы имеют свои преимущества и недостатки. Наиболее современным методом определения параметров взаимодействия является метод вращающегося диска, данный метод позволяет определить кинетическую константу скорости и порядок реакции, а также коэффициент молекулярной диффузии кислоты [9, 10]. Эксперименты на второй установке по исследованию фильтрации проводятся следующим образом. В небольшой цилиндрический образец керна материала (порядка 3 см × 3 см) с постоянным расходом закачивается водный раствор кислоты с фиксированной массовой концентрацией порядка 5–20%. Замеряется динамика перепада давления между входом и выходом и зависимость объема прокачанного флюида от времени. Резкое падение перепада давления свидетельствует о прорыве кислоты на выходе из образца. Во многих экспериментах для наглядности образец керна просвечивается рентгеновским излучением, а результаты просветки подвергаются компьютерной томографии, например [11]. В результате режимы выщелачивания карбонатов можно наглядно увидеть, такие фотографии из работы [12] показаны на рис. 1.

Проведение экспериментов на кернах материала с примерно одинаковым минералогическим составом и значениями фильтрационных параметров позволяют построить зависимости объема прокачанного флюида до формирования сквозной червоточины (далее объем до прорыва) от скорости закачки кислоты. Такая зависимость имеет ярко выраженный минимум, соответствующий формированию сквозной червоточины при критической скорости закачки [3].

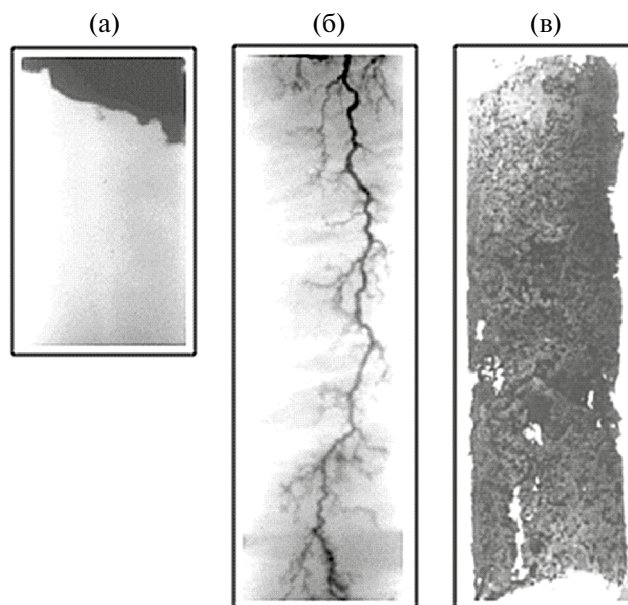


Рис. 1. Компьютерная томография прокачки кислоты через карбонатный образец керна горной породы: (а) фронтальный режим; (б) сквозная червоточина; (в) объемный режим [3]. На фотографиях рентгеновской просветки образцов видны основные режимы выщелачивания карбонатов. Движение кислоты сверху вниз.

Результирующие экспериментальные зависимости обычно нормируются на поровый объем, а расход через безразмерное число Дамкелера, выражающее отношение скорости реакции к фильтрационной скорости [12]. Многие исследователи обрабатывают указанную зависимость также через безразмерные критерии Пекле [13], растворяющей способности кислоты [14]. Отметим, что при этом при неизменном физическом смысле этих критериев их зависимость от коэффициента диффузии, кинетической константы скорости реакции, вязкости раствора может различаться [9, 12, 14, 15 и др.]. Для получения универсальных зависимостей, к сожалению, не хватает результатов детальных исследований влияния фильтрационных параметров и минералогического состава породы, концентрации кислоты, температуры и других параметров на зависимость объема прокачки от критической скорости фильтрации кислоты.

В работе приведены результаты определения параметров кинетики реакции соляной кислоты с доломитовыми образцами, коэффициента диффузии и зависимости объема до прорыва от скорости закачки кислоты при различных ее концентрациях. Оценены безразмерные критерии подобия согласно определениям, используемым в работе [15].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные установки и материалы.

Для экспериментального изучения были отобраны образцы карбонатного коллектора месторождения X, разрабатываемого ООО “Иркутская нефтяная компания”. Разброс характеристик этих образцов приведен в табл. 1, при отборе коллекции подбирались образцы с примерно одинаковыми фильтрационными характеристиками. Как видно из табл. 1, фактически все эксперименты проводились на доломитовых образцах породы. Известно, что повышение доли доломита в составе карбонатной породы снижает скорость взаимодействия последней с растворами соляной кислоты.

Часть образцов с низкими значениями проницаемости и пористости распиливались для формирования “монолитных” дисков – “таблеток” размером 3 см в диаметре и 2 см толщиной для использования в установке вращающегося диска. Боковая поверхность таблеток покрывалась изоляцией, т.е. реакция была возможна только на торцевой поверхности. Установка вращающегося диска и принципиальная схема реактора приведены на рис. 2 [2, 16]. Экспериментальная установка обеспечивает проведение исследований при повышенных давлениях и температурах, соответствующих пластовым условиям. Вращение диска обеспечивалось магнитной мешалкой. Первоначально при фиксированной скорости вращения таблетки определялась зависимость концентрации ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} от времени. Концентрация ионов замерялась методом титрования, для этого каждые 30 с проводился отбор проб жидкости из реактора. Эти зависимости имели ярко выраженный линейный характер, угол наклона которых использовался для определения скорости реакции. По уравнению реакции пересчитывалась удельная (на единицу площади) скорость реакции кислоты на поверхности таблетки J (мкмоль/см² с) при фиксированной скорости вращения. Далее эти исследования проводились для других скоростей вращения.

Вторая часть образцов с параметрами, приведенными в табл. 1, использовалась в фильтрационных экспериментах по определению объема прокачки до прорыва в зависимости от расхода закачиваемой кислоты при разных значениях ее концентрации. При фикси-

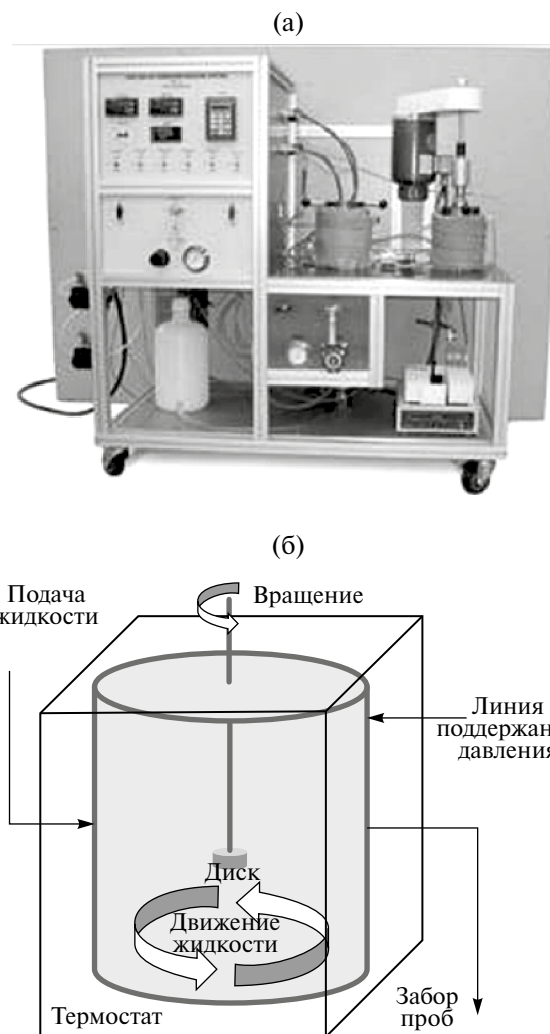


Рис. 2. Фотография установки (а) и принципиальная схема реактора (б) для исследования кинетики растворения вращающегося карбонатного диска.

рованных массовых концентрациях соляной кислоты 9, 12 и 15% проводилось до 14 экспериментов при изменении расходов закачиваемой кислоты.

Фотография установки для фильтрационных экспериментов ПИК АП–3000 приведена на рис. 3. Образец цилиндрического керна в кернодержателе обжимался манжетой для создания напряжений в образце, соответствующих горным давлениям, и помещался в теплообменник для поддержания фиксированной температуры. Подача раствора кислоты в кернавый образец осуществлялась при постоянной скорости, дав-

Таблица 1. Разброс характеристик кернавого материала, использованного в экспериментах

Проницаемость, мД	Пористость, %	Содержание доломитов, %
100–150	14–16	85–100

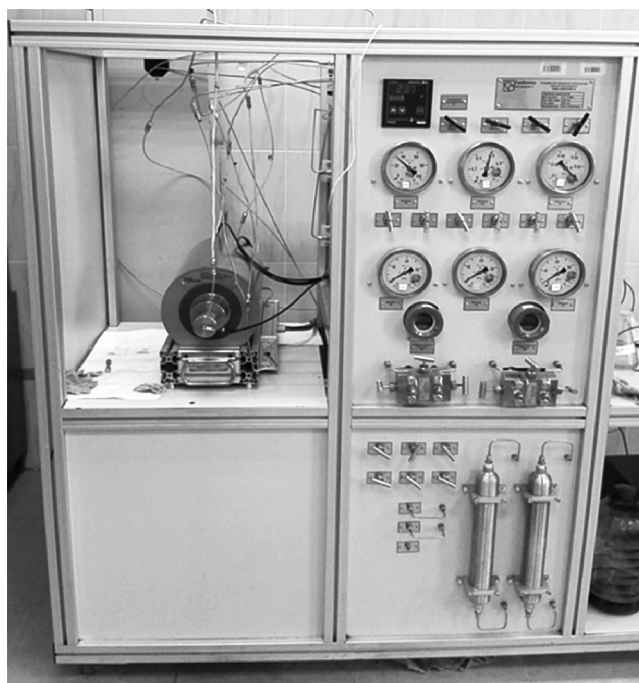


Рис. 3. Фотография установки для исследования однофазной фильтрации ПИК АП-3000.

ление на выходе из образца также поддерживалось постоянным, изменение давления на входе в образец замерялось в постоянном режиме. Так как результаты исследований предполагается использовать для прогноза и оптимизации кислотных реальных обработок, то температура

и давление (во второй установке на выходе из образца) поддерживались равными пластовым значениям: $T = 41^\circ\text{C}$, $P = 7\text{ МПа}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Размеры таблетки консолидированной породы были вдвое меньше диаметра реактора, ранее экспериментально было установлено, что в этом случае краевыми эффектами можно пренебречь [17]. В работе Левича [18] на основе решения уравнения Навье-Стокса было показано, что для ламинарного режима во вращающемся потоке размеры концентрационного подслоя могут изменяться, но его толщина равномерна вдоль всего диска. Этот факт дает основание утверждать, что и раствор кислоты в установке распределен равномерно вдоль всего диска, а его концентрация меняется лишь с удалением от него. Формула Левича для размеров концентрационного слоя имеет вид:

$$\delta = 1.61 \left(\frac{D}{\nu} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}, \quad (1)$$

где δ – толщина концентрационного подслоя жидкости, D – коэффициент молекулярной диффузии кислоты, ν – кинематическая вязкость раствора, ω – угловая скорость вращения диска.

Удельная (на единицу площади) скорость растворения торца карбоната для диффузионного режима определяется выражениями:

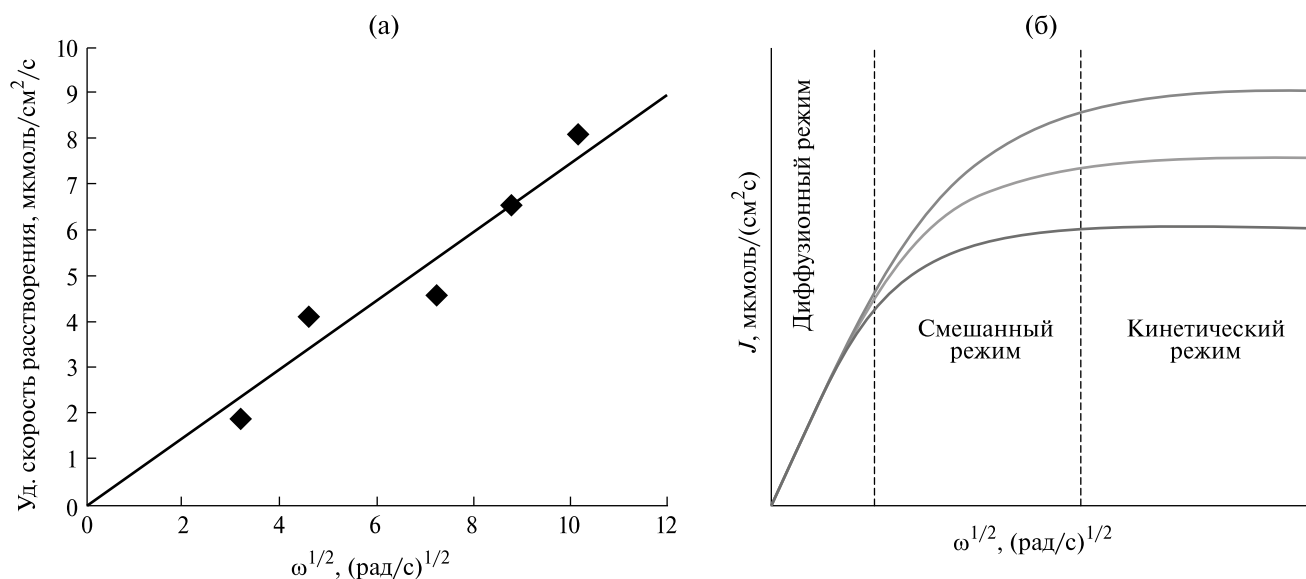


Рис. 4. Экспериментальная зависимость скорости реакции от угловой скорости вращения доломитового диска (а) и теоретическая кривая (б) для карбонатов. J – удельная скорость растворения мкмоль/(см²·с), ω – угловая скорость вращения диска, рад/с.

$$J = -D \frac{dc}{dx} \approx D \frac{c - c_b}{\delta}, \quad (2)$$

где c , c_b — концентрация кислоты на удалении от плоскости реакции и на поверхности таблетки, x — расстояние от плоскости реакции. Так как объем реактора достаточно большой, то концентрация кислоты в объеме изменяется за счет реакции не более 1.5% и принимается равной исходному значению c , для диффузионного режима концентрация кислоты на поверхности c_b принимается равной нулю. В этом случае формула (2) с учетом (1) принимает вид:

$$J \approx \frac{D^{2/3} c_o \sqrt{\omega}}{1.61 \nu^{1/6}}. \quad (3)$$

Результаты измерения удельной скорости растворения от корня квадратного скорости вращения сведены на рис. 4а, для сравнения схематично приведены теоретические представления о процессе (рис. 4б). Экспериментальные точки с высокой точностью аппроксимируются линейным трендом, в то время как схематичные теоретические тренды с ростом скорости выходят на кинетический режим, в котором удельная скорость растворения не меняется с увеличением скорости вращения диска. Таким образом, из сопоставления экспериментальной и теоретических зависимостей видно, что кинетический режим растворения доломитов в исследуемом диапазоне не наблюдается. Проанализированный диапазон угловых скоростей ограничен срывом потока в турбулентный режим. Ввиду того, что линейная скорость обтекания диска максимальна на его границах, то очевидно, что переход в турбулентный режим будет проявляться именно там. На рис. 5 показаны фотографии диска в процессе экспериментов. Видно, что угловые скорости вращения диска до 500 об/мин полностью соответствуют теоретическим допущениям о ламинарности потока и однородности реакции вдоль всего диска. Диапазон от 500 до 1000 об/мин можно считать условно интерпретируемым, так как на границах диска его поверхность становится неравномерной, что может быть интерпретировано как срыв потока в турбулентную область или краевыми эффектами. Режимы скоростей выше 1000 об/мин относятся к режиму развитой турбулентности, в котором традиционная интерпретация не работает.

Оценим значения чисел Рейнольдса в экспериментах. Число Рейнольдса для вращающегося диска выражается формулой [19]:

$$Re = \frac{r_0^2 \omega}{\nu},$$

где $r_0 = 0.015$ м — радиус диска. Для характеристик раствора кислоты в экспериментах: $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 1.2 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, число Рейнольдса равно $Re = 9896$ для угловой скорости $\omega = 500$ об/мин и 19792 для 10000 об/мин.

Полученная зависимость удельной скорости растворения от угловой скорости вращения в ламинарном режиме позволяет рассчитать по формуле (3) коэффициент молекулярной диффузии кислоты. Подставляя тангенс угла наклона экспериментальной кривой в формулу (3), получим значение $D = 3.2 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Полученные результаты согласуются с выводами работ [12, 15, 17], что для доломитов число Дамкелера при ламинарных режимах течения не зависит от кинетической константы скорости реакции, а определяется только диффузионным режимом.

Результаты фильтрационных экспериментов по определению зависимости прокачанного

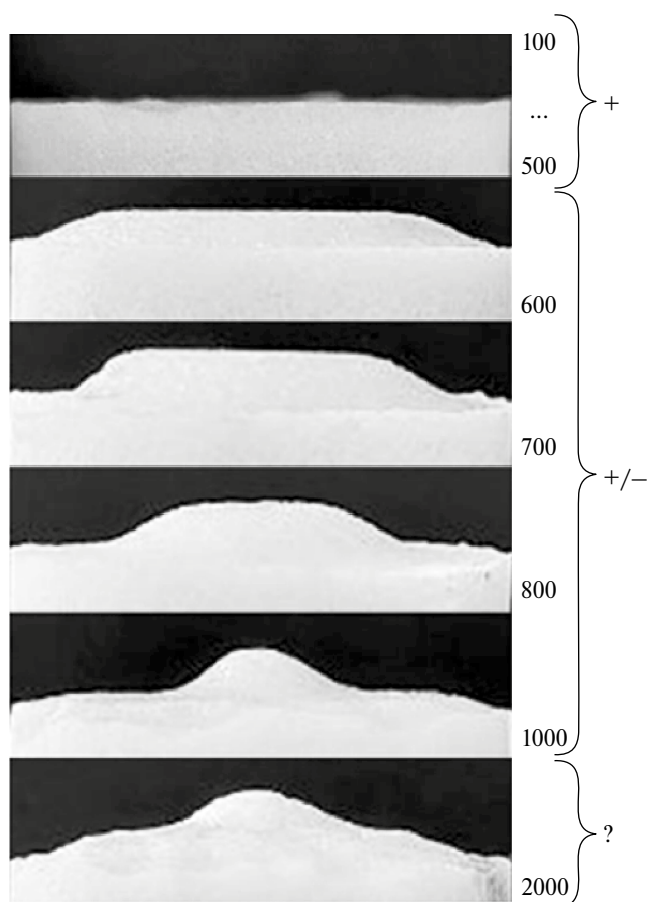


Рис. 5. Конфигурация реагирующей поверхности доломитового диска при различных скоростях угловой скорости (об/мин). Выделены три диапазона скоростей: полностью соответствующего теории Левича (+), влияния краевых условий (+/-) и соответствующих турбулентному режиму (?), в котором теоретические допущения несправедливы.

объема кислоты до прорыва на выходе, нормированного на поровый объем образца породы, от расхода раствора кислоты на входе в образец для исследуемых значений концентрации приведены на рис. 6. Методика проведения экспериментов подробно не обсуждается, так как отработана в работах [4–10, 12 и др.]. Приведенные результаты показывают, что минимальный или критический объем прокачки до прорыва PV_{cr} , фиксируемый по резкому падению давления на входе в образец, падает с ростом концентрации кислоты от 3 до 1.5 поровых объемов. Критический расход для формирования сквозной червоточины q_{cr} также падает от значения 0.5 до 0.1 мл/мин.

Принимая допущение о подобии процессов в образце керна и призабойной зоне скважины в карбонатном пласте, значения критических параметров позволяют связать длину червоточины с объемом закачки. Для вертикальной скважины при фиксированном объеме закачки раствора кислоты V расстояние, на которое проникает червоточина r_{wh} , определяется из экспериментально полученного критического значения объема прокачки:

$$PV_{cr} = \frac{V}{\pi(r_{wh}^2 - r_w^2)\phi h},$$

где r_{wh} — длина формируемых червоточин, r_w — радиус скважины, V — объем закачки раствора

кислоты в пласт, ϕ — пористость призабойной зоны, h — эффективная мощность пласта. Эта формула обобщена для учета ветвистости червоточины через аппарат фрактальных размерностей [14] и может быть переписана через фрактальную размерность червоточины \varkappa :

$$PV_{cr} = \frac{(q_{cr}t)^{\frac{\varkappa+1}{3}}}{\pi\phi h \left((r_{wh} + r_w)^{\varkappa} - (r_w)^{\varkappa} \right)}, \quad (4)$$

где объем закачанной оторочки кислоты при критическом расходе закачки равен: $V = q_{cr}t$. По результатам исследований Daccord, значение фрактальной размерности в 3D-случае лежит между 1.5 и 1.7 [14]. При этом длина формируемых червоточин равна:

$$r_{wh} = \left(\frac{(q_{cr}t)^{\frac{\varkappa+1}{3}}}{\pi\phi h PV_{cr}} + (r_w)^{\varkappa} \right)^{\frac{1}{\varkappa}} - r_w. \quad (5)$$

Обобщение формул (4, 5) на случай слоисто-неоднородного пласта, скважин с трещиной гидроразрыва и другие способы заканчивания скважин достаточно очевидны, но это предмет уже другой специальности [20].

Анализ безразмерных комплексов подобия, определяющих процесс выщелачивания карбонатов. Для прогнозирования процессов роста червоточин были предложены многочисленные полуэмпирические модели, которые можно разбить на три группы [21, 22]: полуэмпирические, сеточные и континуальные. Наибольшее развитие получили полуэмпирические модели, основанные на приведенных ранее экспериментах и связывающие нормированный объем прокачки до прорыва с безразмерными комплексами подобия. Большинство исследователей сходятся на том, что основную роль в процессе роста червоточин играют упомянутые ранее в статье безразмерные числа.

Определение структуры этих чисел могут различаться. В первую очередь разночтения касаются числа Дамкелера. Первоначально Fredd & Fogler [23] предлагали определять число Дамкелера для кинетического режима растворения через “внутренние” параметры червоточины (площадь сечения или диаметр червоточины d и ее длину l).

$$N_{Da}^{kin} = \frac{\pi d l K}{q},$$

где K — скорость реакции, которая выражается через произведение константы реакции \varkappa [23] на массовую концентрацию кислоты, q — рас-

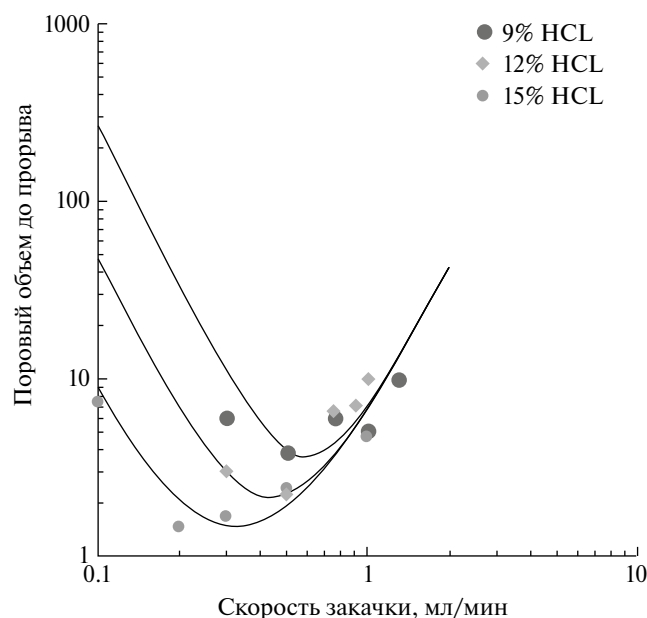


Рис. 6. Результаты фильтрационных экспериментов по определению зависимости объема прокачки до прорыва, нормированного на поровый объем от скорости закачки для выбранных концентраций соляной кислоты.

ход закачиваемой кислоты в линейный образец карбоната ($\text{м}^3/\text{с}$). Скорость реакции однозначно связана с удельной скоростью растворения J , введенной ранее. Скорость реакции является собственно удельной скоростью растворения при использовании массовой концентрации кислоты и имеет размерность $\text{м}/\text{с}$.

Используя “внешние” параметры, число Дамкелера для кинетического режима фильтрации можно выразить как отношение скорости реакции к конвективной скорости. В качестве конвективной скорости используем среднемассовую скорость фильтрации $v = q/(S\phi)$, где S – площадь поперечного сечения образца пористой среды, ϕ – пористость образца. Тогда

$$N_{\text{Da}}^{\text{kin}} \sim \frac{K}{v} = \frac{\kappa C}{v}.$$

Еще раз отметим, что скорость реакции K ни что иное как скорость растворения образца J .

Для диффузионного режима, согласно физическому смыслу числа Дамкелера, его можно выразить как отношение скорости диффузии кислоты к поверхности карбоната к конвективной скорости:

$$N_{\text{Da}}^{\text{dif}} \sim \frac{D}{v\delta} = \frac{D}{1.61v \left(\frac{D}{1/2}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{1}{E}}} \sim \frac{D^{\frac{2}{3}}}{v^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{E_{\text{av}}^{\frac{1}{2}}}} = \frac{D^{\frac{2}{3}} \phi^{1/4}}{v^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (8k)^{1/4}}.$$

Размер диффузионного слоя оценен как средний размер пор $r_{\text{av}} = \sqrt{8k/\phi}$, выраженный согласно формуле Козени-Кармана [24], а угловая скорость равна $\omega = v/r_{\text{av}}$.

Для характерных параметров задачи [15] ($\kappa = 10^{-4} \text{ м}/\text{с}$, $C = 0.1$, $v = 10^{-6} \text{ м}/\text{с}$, $\phi = 0.1$, $D = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $k = 10^{-14} \text{ м}^2$, $v = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) значения безразмерных чисел равны $1/N_{\text{Da}}^{\text{kin}} \sim 10^{-1}$ и $1/N_{\text{Da}}^{\text{dif}} \sim 10^{-2}$. Здесь для сопоставления значений различных чисел используется обратная величина – конвективной скорости к реакционной, для сопоставления с числом Пекле, где скорость конвективного потока стоит в числителе. Для оценок можно принять, что значение 10^{-1} характеризует процесс в кальцитах, а 10^{-2} – в карбонатах.

Число Пекле определяется отношением конвективной скорости к диффузионной. В качестве характерного размера диффузионного слоя также выберем средний размер порового канала, выражаемого формулой Козени-Кармана:

$$N_{\text{Pe}} \sim \frac{v(8k)^{1/2}}{D\phi^{1/2}}.$$

Для параметров, значения которых определены выше, порядок числа Пекле равен $N_{\text{Pe}} \sim 10^{-5}$.

Растворяющая способность кислоты практически всеми исследователями записывается в виде:

$$N_{\text{ac}} = \frac{\phi \chi c p_w}{(1-\phi) \rho_R}.$$

Обратная величина $1/N_{\text{ac}}$ выражает количество поровых объемов раствора кислоты, требующегося для растворения карбонатной матрицы. Для коэффициента растворимости карбоната в соляной кислоте $\chi = 1.6$ порядок растворяющей способности кислоты равен $N_{\text{ac}} \sim 10^{-3}$.

Оценка безразмерных чисел подобия является основой анализа физических процессов, определяющих процесс формирования и развития червоточин при закачке раствора кислоты в карбонатные пласты [25, 26]. Разброс расчетных значений предложенных выражений для безразмерных чисел не высок и разумен: максимальную роль играют кинетические режимы растворения при реализации таковых, в случае диффузионного режима реакции обратное число Дамкелера и число Пекле отличаются на два порядка. Этот разброс указывает, что роль диффузии играет важную роль в реакции, но диффузионный механизм переноса кислоты в пористой среде играет меньшую роль по сравнению с конвективным механизмом ее транспорта. Учет влияния растворяющей способности кислоты важен для всех режимов растворения карбонатов. Отметим, что выражения, предложенные в работах [3, 15] для указанных чисел, приводят к их значительному разбросу (на несколько порядков), что не позволяет сопоставить соотношение роли рассматриваемых эффектов в процессе выщелачивания карбонатной матрицы кислотой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные на основе обработки экспериментальных данных значения коэффициента диффузии, критической скорости закачки кислоты в образец горной породы, нормированной на поровый объем, закачки до прорыва сквозной червоточины согласуются с результатами экспериментов других исследователей.

Показано, как полученные результаты могут быть использованы для определения связи объема закачки кислоты в карбонатный пласт с длиной формируемых при этом червоточин при критическом расходе. Указанные зависимости обобщаются для учета ветвистости червоточин через аппарат фрактальных размерностей.

Установлено, что для доломитов, ввиду низкой скорости реакции, в диапазоне ламинарного течения в пористой среде реализуется только

диффузионный режим реакции с соляной кислотой. Поэтому определение константы скорости реакции и порядка реакции на установке вращающегося диска затруднительно.

Предложены выражения для безразмерных критериев подобия (чисел Дамкелера, Пекле и растворяющей способности кислоты), записанные через внешние параметры горной породы, раствора кислоты. Оценены их значения, и показано, что соотношения чисел верно указывает на роль различных эффектов в процессе выщелачивания карбонатов.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

C	массовая концентрация (безразмерная);
c	молярная концентрация кислоты на удалении от плоскости реакции, моль/м ³ ;
c_b	молярная концентрация кислоты на поверхности таблетки, моль/м ³ ;
D	коэффициент молекулярной диффузии кислоты, м ² /с;
h	эффективная мощность пласта, м;
J	скорость реакции кислоты на поверхности таблетки, моль/(м ² ·с);
K	скорость реакции, м/с;
N_{Da}^{kin}	число Дамкелера, кинетический режим (безразмерное);
N_{Da}^{dif}	число Дамкелера, диффузионный режим (безразмерное);
N_{Pe}	число Пекле (безразмерное);
P	давление, Па;
PV_{cr}	минимальный или критический объем прокачки до прорыва (безразмерный);
q	расход закачиваемой кислоты, м ³ /с;
q_{cr}	критический расход для формирования сквозной червоточины, м ³ /с;
Re	число Рейнольдса;
r_o	радиус диска;
r_w	радиус скважины, м;
r_{wh}	длина формируемых червоточин, м;
S	площадь поперечного сечения образца пористой среды, м ² ;
T	температура, К;
t	время закачки, с;
V	объем закачки раствора кислоты в пласт, м ³ ;
v	скорость фильтрации, м/с;
x	расстояние от плоскости реакции, м;
δ	толщина концентрационного подслоя жидкости, м;
k	константа реакции, м/с;
κ	фрактальная размерность червоточины (безразмерная);

ν	кинематическая вязкость раствора, м ² /с;
ρ	плотность, кг/м ³ ;
ρ_w	плотность водяного раствора кислоты, кг/м ³ ;
ρ_R	плотность скелета породы, кг/м ³ ;
χ	коэффициент растворимости карбоната в соляной кислоте (безразмерный);
W	угловая скорость вращения диска, 1/с;
\emptyset	пористость (безразмерная).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ибрагимов Г.З., Хисамутдинов Н.И.* Справочное пособие по применению химических реагентов в добыче нефти. М.: Недра, 1983.
2. *Schechter R.S.* Oil Well Stimulation. Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1993. P. 436.
3. *Fredd C.N., Fogler H.S.* Influence of Transport and Reaction on Wormhole Formation in Porous Media // *AIChE Journal*. 1998. № 44(9). P. 1933. 10.1002/aic.690440902
4. *Dong K., Zhu D., Hill A.D.* Theoretical and Experimental Study of Optimal Injection Rates in Carbonate Acidizing // *SPE Journal*. 2017. № 22(03). P. 892. 10.2118/178961-PA.
5. *Mumallah N.A.* Factors Influencing the Reaction Rate of Hydrochloric Acid and Carbonate // *Proc. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Anaheim, California, 20-22 February*. 1991. SPE-21036. 10.2118/21036-MS.
6. *Кристиан М., Сокол С., Константиnescу А.* Увеличение продуктивности и приемистости скважин. М.: Недра, 1985.
7. *Телин А.Г., Исмаилов Т.А., Ахметов Н.З.* Комплексный подход к увеличению эффективности кислотных обработок скважин в карбонатных коллекторах // *Нефтяное хозяйство*. 2001. № 8. С. 69.
8. *Харисов Р.Я., Фоломеев А.Е., Коптяева Е.И., Телин А.Г.* Манометрическая установка как инструмент выбора кислотных составов для стимуляции скважин в карбонатных коллекторах // *V Всероссийская научно-практическая конференция "Нефтепромысловая химия", посвященная 80-летию РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина и 50-летию кафедры технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности. РГУ, 24-25 июня 2010 г. Москва: РГУ нефти и газа*. С. 91.
9. *Wang Y., Hill A.D., Schechter R.S.* The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing of Carbonate Formations. SPE-26578. 1993. 10.2118/26578-MS
10. *Panga M. K., Ziauddin M., Balakotaiah V.* Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization // *AIChE journal*. 2005. № 51(12). P. 3231. 10.1002/aic.10574.

11. *Monette M., Nguyen Q.P.* An Experimental Study of Wormhole Morphology with a Novel Acid System in Ultra-High-Temperature Carbonate Reservoirs. *Transport in Porous Media*. 2023. № 149. P. 625. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01976-8>.
12. *Fredd C.N., Fogler H.S.* Optimum Conditions for Wormhole Formation in Carbonate Porous Media: Influence of Transport and Reaction. *SPE Journal*. 1999. № 4(3). 10.2118/56995-PA.
13. *Al-Arji H., Al-Azman A., Le-Hussain F., Regenauer-Lieb K.* Acid stimulation in carbonates: A laboratory test of a wormhole model based on Damköhler and Péclet numbers // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 203. 10.1016/j.petrol.2021.108593.
14. *Daccord G., Touboul E., Lenormand R.* Carbonate acidizing: toward a quantitative model of the wormholing phenomenon // *SPEJ*. 1989. V. 4. № 1. P. 63.
15. *Gong M., El-Rabaa A.M.* Quantitative Model of Wormholing Process in Carbonate Acidizing. 1999. SPE 52165.
16. *Мещеряков А.А., Галиев Н.А., Фоломеев А.Е. и др.* Обоснование оптимальной рецептуры кислотного состава и параметров кислотного воздействия с использованием физико-математического моделирования // *Нефтяное хозяйство*. 2023. № 8. С. 104. 10.24887/0028-2448-2023-8-104-109.
17. *Lund K., Fogler H.S., McCune C.C.* Acidizing-1. The dissolution of dolomite in hydrochloric acid. // *Chemical Engineering Science*. 1973. V. 28. № 3. P. 691.
18. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. М.: Физматгиз, 1959.
19. *Дамаскин Б.Б.* Введение в электрохимическую кинетику / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. М.: Высшая школа, 1975.
20. *Burton R.C., Nozaki M., Zwarich N.R., Furui K.* Improved understanding of acid wormholing in carbonate reservoirs through laboratory experiments and field measurements. SPE-191625-RA. 2020. DOI: <http://doi.org/10.2118/191625-PA>.
21. *Akanni O.O., Nasr-El-Din H.A.* The Accuracy of Carbonate Matrix-Acidizing Models in Predicting Optimum Injection and Wormhole Propagation Rates // *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. 2015. pp. SPE-172575-MS. <https://doi.org/10.2118/172575-MS>.
22. *Glasbergen G., Kalia N., Nalbot M.* The Optimum Injection Rate for Wormhole Propagation: Myth or Reality. SPE 121464. 2009.
23. *Fredd C.N., Fogler H.S.* The kinetics of calcite dissolution in acetic acid solutions // *Chemical Engineering Science*. 1998. № 53(22). P. 3863. 10.1016/S0009-2509(98)00192-4.
24. *Гиматудинов Ш.К.* Физика нефтяного и газового пласта. // *Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И.* М.: Альянс, 2021.
25. *Santos Lucas C.R., Neyra J.R., Araujo E.A, 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. V. 220. 10.1016/j.petrol.2022.111168.
26. *Ghommem M., Zhao W., Dyer S., Qiu X., Brady D.* Carbonate acidizing: Modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. № 131. P. 18. 10.1016/j.petrol.2015.04.021

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE KINETICS OF THE REACTION OF HYDROCHLORIC ACID WITH CARBONATE ROCKS UNDER THERMOBARIC BED CONDITIONS

R. M. Ganopol'skii^{a,*}, B. R. Gil'mutdinov^b, A. V. Zhonin^c, T. M. Mukhametzhanov^c, K. M. Fedorov^{a,**},
A. E. Folomeev^b

^aFGAOU VO Tyumen State University, Tyumen, Russia

^bOOO Irkutsk Oil Company, Irkutsk, Russia

^cALTIM LLC, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

*e-mail: r.m.ganopolskij@utmn.ru

**e-mail: k.m.fedorov@utmn.ru

Abstract. Interaction of acid with carbonate rocks is the basis for the processes of increasing productivity of producing wells and intensification of oil production from carbonate reservoirs. Dissolution of carbonates under conditions of filtration of acid solution through porous medium is determined by competition of chemical reaction processes and convective transfer of acid. Research on these competing processes is carried out in two main setups: a rotating carbonate disk washed by acid flow and an acid solution filtration setup through carbonate reservoir samples. The paper presents the results of such research with discussion of results and discussion of the reaction kinetics parameters on a sample of a particular field. The values of diffusion and reaction kinetics, critical rate of wormhole formation in porous medium at different concentrations of hydrochloric acid have been calculated. The values of the main dimensionless similarity complexes: Damköhler and Peclet numbers and acid solubility were estimated.

Keywords: acid treatment of carbonates, wormholes, diffusion, rotating disk