

На правах рукописи

СМИРНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЧКИ
КИСЛОТЫ В КАРБОНАТНЫЙ ПЛАСТ С УЧЕТОМ
ФОРМИРОВАНИЯ «ЧЕРВОТОЧИН»**

Специальность: 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень 2011

Работа выполнена на кафедре моделирования физических процессов и систем Тюменского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Федоров Константин Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Булгакова Гузель Талгатовна
доктор физико-математических наук
Татосов Алексей Викторович

Ведущая организация: ГАНУ «Институт нефтегазовых технологий и новых материалов» АН РБ

Защита состоится «15» апреля 2011 г. в 16⁰⁰ на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «12» марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Мусакаев Н.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Кислотные обработки карбонатных коллекторов являются наиболее распространенным способом химического воздействия на призабойную зону скважин для интенсификации добычи нефти. Несмотря на многолетний опыт применения и большой объем проведенных исследований, направленных на совершенствование и повышение эффективности метода, значительная часть обработок дает не высокие результаты. По различным оценкам, успешность проведения кислотных обработок на многих месторождениях не превышает 30%. Так как работы по кислотной обработке не требуют высоких затрат, то разработке более дорогостоящих технологий и детальному исследованию процесса не уделяется существенное внимание.

Все это привело к тому, что на сегодняшний день существуют различные технологии проведения кислотных обработок от кислотных ванн с «нулевой» скоростью обработки до критических скоростей с превышением давления разрыва с формированием кислотного ГРП. Однако, при наличии широкого спектра кислотных систем до сих пор нет ясности при каких условиях наиболее эффективно применять ту или иную технологию; на практике сложившиеся методики выбора технологии отсутствуют.

С другой стороны, на экспериментальном уровне доказано наличие оптимального режима закачки, зависящее от безразмерного числа Дамкелера (Damköhler) и связанное с формированием "червоточин" в процессе кислотной обработки. Применение выводов этих экспериментов на промышленном уровне отсутствует, так как недостаточно разработана теоретическая база, описывающая данные эффекты.

Цель работы. Создание математической модели кислотных обработок скважин, которая учитывает явление образования "червоточин" и основывается на результатах экспериментальных исследований. Анализ

влияния основных параметров процесса на эффективность кислотных обработок скважин.

Основные задачи исследований:

Обработка данных лабораторных экспериментов по изучению кинетики химических реакций кальцитов и доломитов с соляной кислотой, определение порядка реакции и констант скорости.

Создание физико-математической модели распространения кислоты в карбонатном пласте с учетом образования "червоточин", зависящей от безразмерного комплекса подобия, аналогичного числу Дамкелера.

Разработка петрофизической модели, учитывающей эффект формирования "червоточин" и результаты экспериментальных исследований на керне.

Анализ влияния основных безразмерных параметров. Поиск «оптимальных» условий закачки кислотных составов. Разработка практических рекомендаций для повышения эффективности кислотных обработок скважин.

Методы решения поставленных задач. Для решения поставленных задач использовались методы экспериментального исследования кинетики химической реакции образцов керна карбонатной породы с соляной кислотой, обработка полученных данных, анализ и обобщение результатов проведенных лабораторных исследований, методы механики многофазных сред для описания многокомпонентной фильтрации раствора кислоты, подход Козени-Кармана для получения петрофизической модели, связывающей распределение проницаемости и пористости.

Защищаемые положения:

Порядок химических реакций соляной кислоты с основными компонентами карбонатной породы – кальцитами и доломитами; константы скорости поверхностной реакции соляной кислоты с кальцитами и доломитами.

Петрофизическая модель пористой среды, учитывающая явление образования "червоточин".

Математическая модель процесса закачки кислоты в карбонатный пласт, содержащая четыре безразмерных параметра.

Результаты математического моделирования, показывающие влияние явления образования "червоточин" на эффективность кислотной обработки.

Научная новизна:

Установлены кинетические уравнения реакции кальцитов и доломитов с содержанием основного вещества не менее 90 %, определены константы скорости реакций.

На основе капиллярной модели пористой среды с учетом результатов описанных в литературе экспериментальных исследований разработана петрофизическая модель, связывающая проницаемость с пористостью с учетом формирования "червоточин".

Разработана математическая модель процесса кислотной обработки скважин с учетом образования "червоточин", линеаризация которой позволила получить аналитическое решение задачи о закачке кислоты в скважину для нулевого и первого порядков реакции.

Установлен характер влияния основных безразмерных параметров на прирост дебита скважины. Показано, что учет явления образования "червоточин" позволяет определить технологические параметры процесса кислотной обработки, при которых достигается максимальный прирост дебита скважины при ограничении забойного давления ниже давления разрыва горной породы.

Практическая значимость работы:

Разработана методология учета явления формирования "червоточин" при математическом моделировании процесса кислотной обработки призабойной зоны скважин. Установлено влияние безразмерных параметров (начальная пористость и концентрация, безразмерный объем оторочки, число Дамкелера) на прирост дебита после кислотной обработки. Созданная

физико-математическая модель процесса закачки кислоты в карбонатный пласт может служить основой для разработки универсальной методики кислотных обработок, позволяющей определить параметры закачки раствора кислоты для достижения максимальной эффективности обработки.

Достоверность результатов обусловлена тем, что моделирование процесса кислотных обработок основано на общепринятых уравнениях сохранения масс компонентов потока с учетом данных экспериментальных исследований на керне и результатов лабораторных исследований по кинетике химических реакций, проведенных в соответствии опубликованными руководствами и государственными стандартами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Научно-практическая конференция молодых специалистов и студентов ЗАО «Тюменский институт нефти и газа» (Тюмень, 2008, 2009);
2. Российская конференция "Многофазные системы: природа, человек, общество", посвященной 70-летию академика Р.И. Нигматулина (Уфа, 2010);
3. Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE (Москва, 2010).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 работах, список которых приведен в конце автореферата, включая 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК России.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 98 страниц, включая 4 таблицы, 29 рисунков и список литературы из 86 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, д.ф.-м.н., профессору К.М. Федорову, идеи которого легли в основу диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели, задачи, новизна и практическая значимость работы.

В первой главе освещены история и современные представления о кислотных обработках скважин, приведен обзор и анализ работ, посвященных теоретическим исследованиям процессов закачки кислоты в пористую среду.

Кислотные обработки – это физико-химический метод интенсификации притока нефти в скважинах. Целью кислотной обработки является улучшение продуктивности пласта путем растворения «загрязнений» или создания новых приточных каналов в пределах от нескольких сантиметров до одного-двух метров вокруг ствола скважины. Механизм воздействия заключается в том, что закачиваемая кислота вследствие химической реакции способствует образованию новых пустот и каналов за счет выноса на поверхность растворенной части породы, пластового цемента и материала, загрязняющего призабойную зону пласта.

Кислотная обработка скважины впервые была применена в 1895 году. С тех пор техника и технология этого метода интенсификации постоянно развивались и совершенствовались. В настоящее время в нефтедобывающей промышленности различают несколько видов кислотной обработки скважин карбонатных коллекторов: кислотные ванны, простые кислотные обработки и обработки под давлением ПЗС, термокислотные обработки, селективные кислотные обработки.

Теоретическими и экспериментальными работами по изучению распространения кислоты в пласт занимались Labrid J.C., Daccord G., McCune C.C., Fogler H.S., Fredd C.N., Golfier F., Bazin B., Ентов В.М., Зазовский А.Ф., Доманский А.В., Пеньковский В.И., Каневская Р.Д., Булгакова Г.Т., Федоров К.М., и др.

При анализе микропроцессов, происходящих на уровне отдельных пор, в процессе кислотной обработки карбонатных коллекторов, в первую очередь, выделяют процесс формирования "червоточин" или отдельных, высоко проводящих поровых каналов, в которых расходуется большая часть кислоты. Диапазон форм "червоточин" изменяется от однородных пустот вблизи области закачки (полное растворение среды) при низких скоростях фильтрации до сильно разветвленных структур при высоких скоростях закачки (рис. 1).

Формирование каналов, близких по форме к прямым, связано с наиболее эффективным процессом кислотной обработки скважин в карбонатных пластах, так как в этом случае минимальное количество кислоты приводит к образованию каналов, связывающих скважину с невозмущенной областью пласта, а проницаемость в зоне реакции увеличивается на несколько порядков.

Геометрическую структуру образуемых "червоточин" в литературе связывают с числом Дамкелера, определяемым как отношение скорости химической реакции к скорости подвода реагента к поверхности реакции.

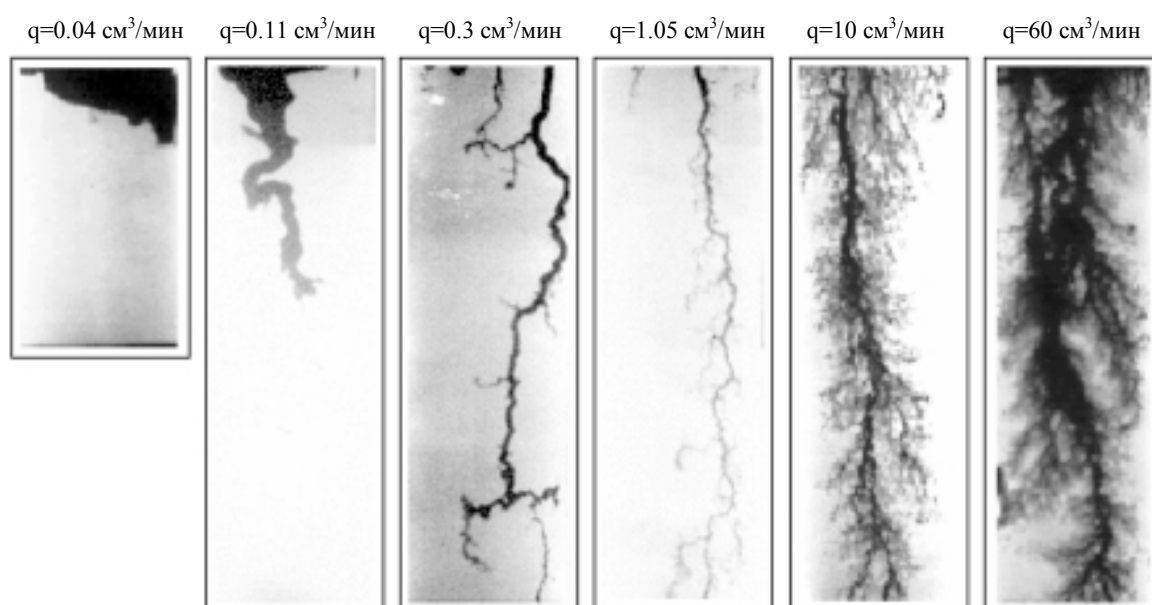


Рис.1. Диапазон изменения форм "червоточин" при различных скоростях закачки раствора в карбонатный коллектор [1]

Его значение определяет тип реакции: диффузионный при больших значениях числа и кинетический при малых. При характерных скоростях фильтрации жидкости через горные породы реализуется кинетический тип реакции, поэтому число Дамкелера для анализируемых процессов формулируется как отношение скорости реакции к скорости фильтрации раствора кислоты в пористой среде. Многочисленные опубликованные эксперименты показали, что оптимальный, с точки зрения эффективности, процесс закачки раствора кислоты соответствует значению числа Дамкелера равному 0.3 (рис.2).

Экспериментальные данные основаны на анализе микроструктуры потока, в реальности в призабойной зоне образуется достаточно большое количество таких "червоточин". Для прогнозирования результатов кислотной обработки карбонатных пластов необходимо определить изменение осредненных фильтрационно-емкостных параметров призабойной зоны.

Во второй главе рассматриваются физико-химические аспекты взаимодействия кислот с карбонатными породами.

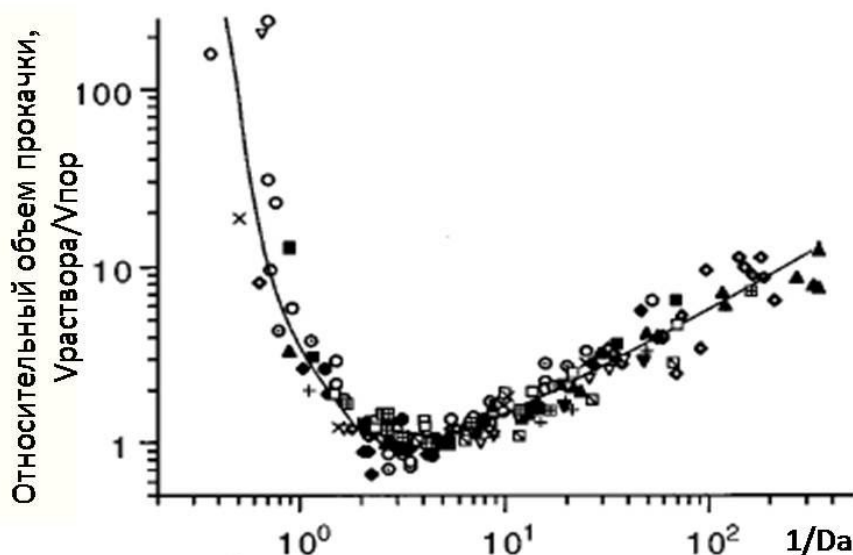


Рис.2. Универсальная зависимость объема прокачанного раствора кислоты до момента его прорыва на выходе из образца, отнесенного к поровому объему, от обратного числа Дамкелера [1]

Важной составляющей в определении оптимального режима соляно-кислотной обработки являются кинетические параметры протекания реакции, которые могут быть определены только из экспериментов.

Карбонатные породы в основном состоят из двух компонентов: кальцита (CaCO_3) и доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). При отборе образцов пород для экспериментов ставилась задача изучения кинетики реакции для кальцитных карбонатов и доломитных карбонатов (с содержанием основного минерала выше 85%). Поэтому перед началом экспериментов методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН 3М определялся минералогический состав образцов. Эксперименты проводились на отобранных таким образом образцах с разной площадью поверхности и при трех концентрациях соляной кислоты (2.5, 5 и 10%), при постоянной температуре 20°C и давлении 1 атм. Характеристики использованных образцов карбонатной породы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Образцы, используемые в эксперименте

№	Порода	Площадь поверхности образцов, cm^2	Минералогический состав
1	Известняк месторождения Алибекмола (Казахстан)	11.6-30.5	100% кальцита, следы полевого шпата
2	Карбонатная порода с преобладанием в составе доломита месторождения Алибекмола (Казахстан), нефтенасыщенная.	7.26 – 9.61	85% доломит, 13% кальцит, 2% полевой шпат

Образцы брали достаточно большого размера, чтобы обеспечить значительный избыток породы по отношению к кислоте и избежать существенного изменения площади поверхности в ходе реакции. Расход кислоты рассчитывался по выделению углекислого газа из стехиометрического баланса химической реакции.

Для количественного описания химической реакции необходимо сформулировать понятие скорости реакции. Определим скорость реакции (v)

как изменение массы кислоты в единицу времени. Для математического описания скорости реакции обычно используется уравнение, близкое по форме к виду закона Гульдберга-Вааге для гомогенной реакции. Смысл обобщения заключается во введении зависимости константы реакции от площади контакта фаз:

$$v = \frac{d\rho_a V_a C_a}{dt} = \sigma S C_a^n C_r^m,$$

где C_i – массовые концентрации компонентов, вступающих в реакцию (a – кислота, r – карбонатная порода), n , m – показатели реакции по кислоте и породе, S – реагирующая площадь поверхности минерала, ρ_a – плотность раствора кислоты, V_a – объем раствора кислоты, σ – поверхностная константа реакции.

Направление реакции характеризуется константой равновесия; для рассматриваемой реакции константа равновесия стремится к бесконечности, поэтому в дальнейшем будем считать реакцию необратимой. Так как реакции в призабойной зоне скважин и в экспериментах происходят при избытке карбонатов (можно принять $C_r \sim 1$), то удельную скорость реакции будем определять только через концентрацию кислоты:

$$\frac{dC_a}{dt} = \frac{\sigma S}{\rho_a V_a} C_a^n = K C_a^n, \quad (1)$$

где K – объемная константа скорости реакции, а показатель n для гетерогенных реакций обычно меняется в пределах от 0 до 2.

Кинетическая кривая химической реакции (зависимость концентрации кислоты от времени), согласно решению уравнения (1), для $n=0$ есть прямая линия, а для $n=1$ – экспоненциальная.

В гетерогенных реакциях постоянной характеристикой остается константа поверхностной скорости реакции, поэтому кинетические кривые необходимо представить в преобразованных координатах: приведенной

массовой концентрации (отношения текущей концентрации к начальному значению, C/C_0) и величине, обратной константе поверхностной реакции:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{\sigma S}{\rho_a V_a} t = 1 - \sigma a, \quad (2)$$

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\sigma \frac{St}{\rho_a V_a}\right) = \exp(-\sigma a). \quad (3)$$

Все экспериментальные зависимости, соответствующие различным объемам и формам образцов минералов и с разными исходными концентрациями соляной кислоты, пересчитанные с учетом (2) для доломита и (3) для известняка, могут быть аппроксимированы одной прямой, что говорит об обоснованности исходных представлений о кинетике данных реакций. Результаты экспериментов приведены на рис. 3.

Как следует из обработанных данных, реакция доломитов преимущественно нулевого, а кальцитов (известняка) первого порядков. Значения поверхностных констант реакции для доломитов и кальцитов одного порядка и равны соответственно 0.15 и 0.25 (кг/с/м²).

Третья глава посвящена разработке математической модели процесса кислотной обработки карбонатных пластов, с учетом формирования "червоточин" (зависящей, в числе прочих, от безразмерного комплекса, аналогичного числу Дамкелера).

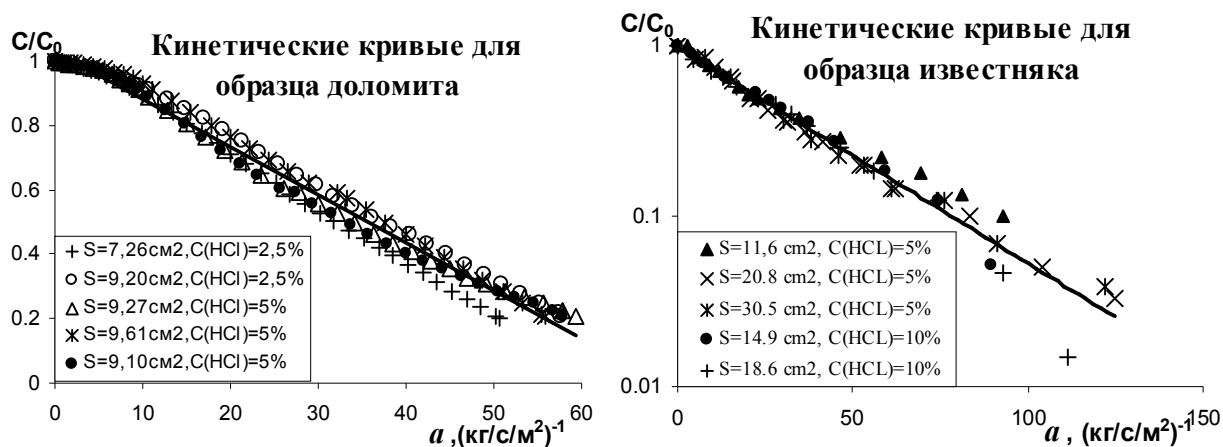
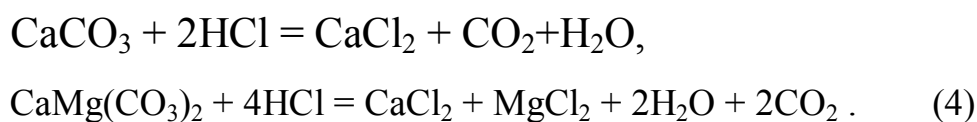


Рис.3. Кинетические кривые для реакции кислоты с карбонатами

Процесс кислотной обработки карбонатных пластов в работе рассматривается в рамках однофазной многокомпонентной изотермической фильтрации однофазной несжимаемой жидкости в однородном пласте (в цилиндрической системе координат) при условии, что продукты реакции полностью растворяются в водной фазе. Диффузионные процессы в пласте развиваются в течение значительно больших времен, чем время закачки растворов реагентов в пласт (несколько часов), поэтому их вкладом при моделировании процессов обработки призабойной зоны скважин пренебрегается (числа Пекле велики).

Основной процесс, протекающий в породе при проведении кислотных обработок, это растворение карбонатов. Химические реакции кальцита и доломита с соляной кислотой представляются уравнениями:



С учетом сделанных допущений процесс конвективного переноса примеси кислоты с учетом ее химической реакции с карбонатной матрицей описывается уравнениями сохранения масс исходных веществ и продуктов химической реакции (4):

$$\rho_i^0 \frac{\partial C_i m}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m v \rho_i^0 C_i) = \chi_i J, \quad (i=1,2,3,4) \quad (5)$$

$$\rho_r^0 \frac{\partial (1-m)}{\partial t} = -\chi_5 J, \quad (6)$$

где J – интенсивность массообмена кислоты за счет химической реакции, v – среднемассовая скорость раствора, m – пористость, ρ_i^0 – истинная плотность флюида, ρ_r^0 – истинная плотность породы, C_i – массовая концентрация i -го реагента (1 – кислота, 2 – растворимая в воде соль кальция, 3 – углекислый газ, 4 – вода), χ_i – стехиометрический коэффициент реакции i -го реагента (масса реагирующего вещества на килограмм кислоты), χ_5 –

стехиометрический коэффициент для минерала породы, r – радиальная координата, t – время.

Сформулированная система уравнений (5), (6) должна замыкаться заданием закона кинетики химической реакции или связи интенсивности массообмена J с концентрацией реагентов и продуктов реакции. Реакция принимается необратимой, протекающей с избытком породы. Обозначив концентрацию соляной кислоты через C , уравнение кинетики реакции можно задать в упрощенном виде: $J = HC^n$. Значение кинетической константы H находится по аналогии с формулой (1), однако определяет изменение массы кислоты за единицу времени и в единице объема. Зависимость J от определенной экспериментально константы поверхностной скорости реакции σ находится в виде:

$$J = S_r \sigma \cdot C^n,$$

где S_r – удельная поверхность реакции (отношение площади реакции к объему, в котором она происходит).

После процедур линеаризации и обезразмеривания система определяющих уравнений (5), (6) может быть приведена к виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial T} + \frac{\partial C}{\partial X} &= -\frac{Da_m}{m_0} C^n, \\ \frac{\partial m}{\partial T} &= \beta Da_m C^n. \end{aligned} \quad (7)$$

Начальные и граничные условия в безразмерном виде запишутся:

$$T=0: C=0; m = m_0; 0 < T < 1: X > X_0: C=C_0.$$

Поведение процесса, описываемого в рамках сформулированной системы уравнений, определяется следующими безразмерными параметрами:

$$Da_m = \frac{\sigma S_r V_a}{\rho_l^0 q}, \quad \beta = \frac{\chi_5 \rho_l^0}{\rho_r^0}, \quad v = \frac{V_a}{\pi r_w^2 h}, \quad m_0, \quad C_0. \quad (8)$$

Здесь m_0 – начальная пористость пласта, C_0 – начальная концентрация закачиваемой кислоты, β – стехиометрическое отношение расходуемой в

реакции кислоты и породы, v – безразмерный объем закачки раствора кислоты, r_w – радиус скважины, h – эффективная толщина пласта.

В представленной системе уравнения получается аналогичный по смыслу числу Дамкелера критерий подобия – Da_m , его физический смысл заключается в отношении скорости реакции к расходу раствора кислоты, подаваемому в скважину.

В случае образования одной "червоточины" безразмерный комплекс Da_m можно выразить через число Дамкелера Da , определенное в статье по исследованию формирования "червоточин" на керне [1] как

$$Da = \pi dl \sigma / \rho_i^0 q :$$

$$Da_m = S_r \frac{\sigma V_a}{\rho_i^0 q} = \frac{S_{eff}}{V} \frac{\sigma V_a}{\rho_i^0 q} = \frac{\pi dl \sigma}{q \rho_i^0} \frac{V_a}{V} = Da \frac{V_a}{V}, \quad (9)$$

где d, l, S_{eff} – соответственно диаметр, длина и боковая площадь поверхности "червоточины", на которой происходит реакция. Отношение объема закачки к объему пласта, в который раствор был закачан, можно определить из равенства масс прореагировавшей кислоты и растворенной породы:

$$V_a C \rho_i^0 = \chi_5 V \Delta m \rho_R^0 \Rightarrow \frac{V_a}{V} = \frac{\chi_5 \Delta m \rho_R^0}{C \rho_i^0} = \gamma,$$

где Δm – полное изменение пористости; величина Δm определяется интегрированием полученного распределения $m(X)$ в пределах от X_0 до 1.

Система линейных гиперболических уравнений (7) решена с использованием метода характеристик. Для нулевого порядка реакции показатель степени n равен 0, в этом случае интенсивность массообмена J является постоянной величиной. Распределения концентрации кислоты и пористости на момент окончания закачки $T=1$ при условии $X_0 \leq X \leq 1$ имеют вид:

$$\begin{cases} C' = C_0 + \frac{Da_m}{m_0} (X_0 - X), & X < X_f, \\ C' = 0, & X > X_f, \end{cases} \quad X_f = \frac{C_0 m_0}{Da_m} + \frac{m_0}{v}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} m' = m_0 + \beta Da_m (1 - X + X_0), & X < X_f, \\ m' = m_0, & X > X_f, \end{cases} \quad (11)$$

где X_f – радиус зоны проникновения кислоты в пласт, а $X=l$ – радиус проникновения жидкости в пласт.

После окончания закачки оторочки кислоты значительная ее часть остается в призабойной зоне и продолжает вступать в реакцию с минералами горной породы. Этот процесс заканчивается полной нейтрализацией кислоты. Для определения окончательного распределения пористости после полной нейтрализации кислоты необходимо решить полученную систему дифференциальных уравнений (7) при нулевой скорости, а в качестве начальных условий использовать распределения концентрации кислоты и пористости на момент остановки закачки, определяемых по формулам (10), (11). Решение этой задачи имеет вид:

$$\begin{cases} m = m_0 + m_0 \beta C_0 + \beta Da_m + 2 \beta Da_m (X_0 - X), & X < X_f, \\ m = m_0, & X > X_f, \end{cases} \quad (12)$$

На рис. 4 приведено распределение пористости после полной нейтрализации кислоты в пласте.

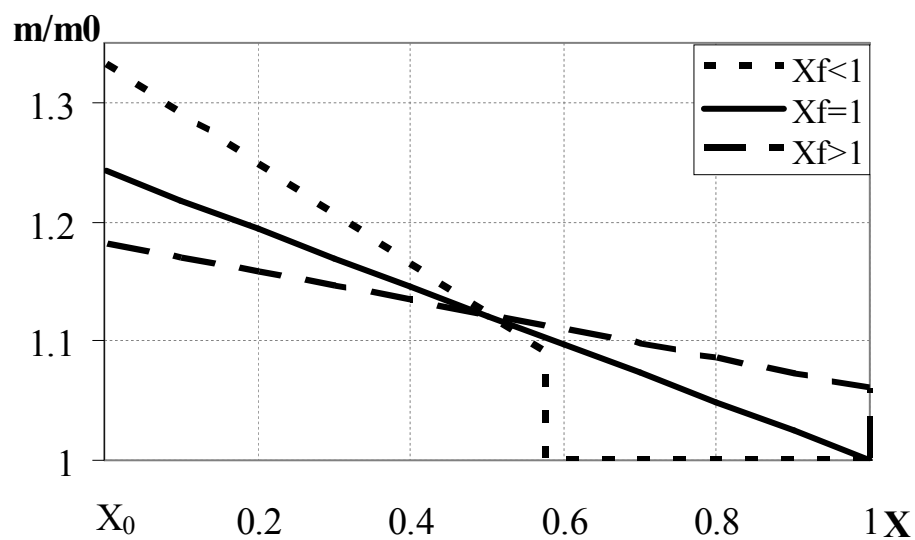


Рис. 4. Полное распределение пористости после реагирования всей кислоты

Изменение пористости вблизи забоя скважины зависит от режима закачки реагента: чем больше безразмерный параметр Da_m , тем выше значения пористости вблизи скважины и тем заметнее падение пористости в пласте. При высоких значениях числа Дамкелера линейное распределение переходит в разрывное, так как закачиваемая оторочка на переднем фронте «обедняется» кислотой до нуля. Общее увеличение порового объема в призабойной зоне одинаково для всех случаев.

Для первого порядка реакции ($n=1$) ее скорость пропорциональна концентрации кислоты в потоке жидкости. В этом случае алгоритм решения задачи распространения кислоты в призабойной зоне скважины аналогичен: сначала строится решение о распределении концентрации кислоты и пористости в призабойной зоне, далее оценивается влияние изменение пористости в результате взаимодействия матрицы с кислотой после закачки раствора.

Решение на момент закачки оторочки раствора имеют вид:

$$\begin{cases} C'(X) = C_0 \exp\left(-\frac{Da_m}{m_0}(X - X_0)\right), & X < X_f, \\ C'(X) = 0, & X > X_f, \end{cases}$$

$$\begin{cases} m'(X) = m_0 + \beta Da_m (1 - X + X_0) C_0 \exp\left(-\frac{Da_m}{m_0}(X - X_0)\right), & X < X_f, \\ m'(X) = m_0, & X > X_f, \end{cases}$$

На момент нейтрализации всей кислоты в призабойной зоне:

$$\begin{cases} m(X) = m_0 + (m_0 \beta + \beta Da_m (1 - X + X_0)) C_0 \exp\left(-\frac{Da_m}{m_0}(X - X_0)\right) & X < X_f \\ m(X) = m_0 & X > X_f \end{cases} \quad (13)$$

В четвертой главе проводится оценка эффективности кислотных обработок на основе результатов математического моделирования и экспериментов по кинетике химической реакции.

Математические модели фильтрационных процессов в призабойной зоне скважин оперируют с осредненными уравнениями фильтрации, в которых отсутствуют в явном виде поровые каналы и "червоточины".

Отражением структуры пористой среды и течения в ней жидкостей являются корреляционные соотношения: проницаемость – пористость среды, которые также называют петрофизическими моделями. Классической схемой определения петрофизической модели является схема Козени-Кармана, в которой пористая среда моделируется пачкой капилляров.

Рассмотрим петрофизическую модель, схематически представляющую пористую среду после образования "червоточин". Положим, что удельное число каналов на единицу площади поперечного сечения пористой среды равно n , но реакция происходит только в f каналах, тогда зависимости пористости и проницаемости от радиусов исходных капилляров и каналов, в которых течет реакция, будут выглядеть следующим образом:

$$m = \pi(n - f)r_0^2 + \pi fr^2, \quad m_0 = \pi nr_0^2, \quad \frac{m}{m_0} = 1 + \frac{f}{n} \left(\frac{r^2}{r_0^2} - 1 \right),$$

$$k = \frac{\pi(n - f)\tau r_0^4}{8} + \frac{\pi f \tau r^4}{8}, \quad k_0 = \frac{\pi n \tau r_0^4}{8}, \quad \frac{k}{k_0} = \frac{(n - f)r_0^4}{nr_0^4} + \frac{fr^4}{nr_0^4} = 1 + \frac{f}{n} \left(\frac{r^4}{r_0^4} - 1 \right),$$

где n – число капиллярных каналов на единице площади образца, f – число каналов, в которых течет кислота и происходит химическая реакция, τ – извилистость капиллярных каналов, r_0 – исходный радиус поровых каналов, r – радиус "червоточин" после взаимодействия породы с кислотой, m_0 и m – пористость до и после обработки, k_0 и k – проницаемость до и после обработки. Тогда связь между проницаемостью и пористостью этой среды при наличии каналов "червоточин" принимает следующий вид:

$$\left(\frac{k}{k_0} - 1 \right) = \left(\frac{m}{m_0} - 1 \right)^2 \frac{n}{f} + 2 \left(\frac{m}{m_0} - 1 \right). \quad (14)$$

Как показали эксперименты на керне (рис.1), отношение n/f зависит от числа Дамкелера: в нуле и на бесконечности оно равно единице и имеет минимум при оптимальном числе Дамкелера $Da_{eff} = 0.3$. Таким условиям, например, удовлетворяет зависимость логнормального распределения (рис.5). Учитывая взаимосвязь между Da и Da_m (соотношения (8) и (9)),

зависимость удельного количества образовавшихся "червоточин" от Da_m выглядит следующим образом:

$$\frac{f}{n} = 1 - \exp[-(\ln Da_m / \gamma - \ln Da_{eff})^2 / \lambda]. \quad (15)$$

Коэффициент λ был получен из условия соответствия кривизны логнормального распределения и экспериментальной зависимости (рис. 2), полученной в опубликованных исследованиях на керне. Отметим, что в выбранной зависимости отношение f/n при оптимальном числе Дамкелера Da_{eff} стремится к нулю, так как даже в экспериментах на керновом материале количество "червоточин" несравнимо с общим количеством поровых каналов.

Найдя распределение проницаемости в результате кислотной обработки на основе полученных решений для пористости (12) или (13) с учетом полученной петрофизической зависимости (14), (15), можно оценить эффективность данного процесса.

Дебит скважины до воздействия определяется классической формулой Дюпюи. Для определения дебита скважины после воздействия воспользуемся обобщенной формулой Дюпюи при условии радиального изменения проницаемости призабойной зоны.

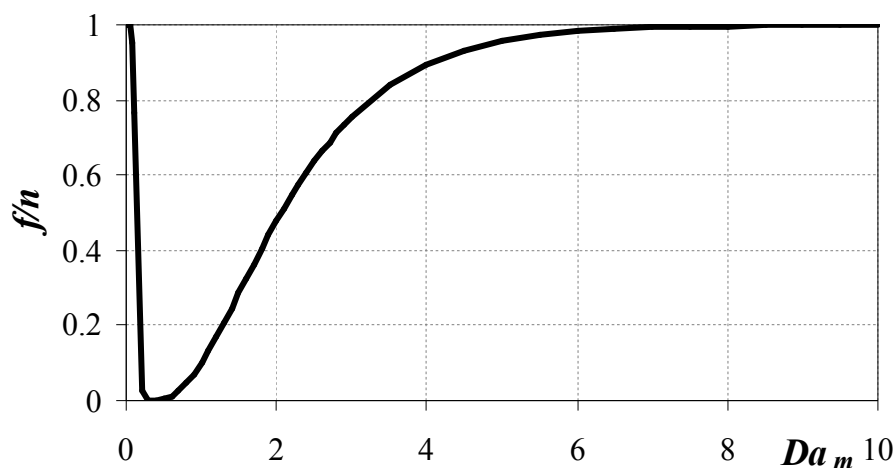


Рис. 5. Зависимость удельного количества "червоточин" от числа Дамкелера (логнормальное распределение)

Эффективность процесса кислотной обработки скважины в рамках предложенной схемы представляется как отношение дебитов жидкости после воздействия к дебиту жидкости до воздействия:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\ln(r_c/r_w)}{k_0 \int_{r_w}^{r_f} (kr)^{-1} dr + \ln(r_c/r_f)}, \quad (16)$$

где Q и Q_0 – дебиты скважины до и после кислотной обработки, r_c , r_f – радиусы контура питания и фронта закачки.

Изменение проницаемости призабойной зоны после кислотной обработки можно описать в рамках дополнительного скин-фактора s этого воздействия.

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\ln(r_c/r_w)}{\ln(r_c/r_w) + s}. \quad (17)$$

Величину скин-фактора можно определить из соотношения (16), в безразмерном виде записывается следующим образом:

$$s = \frac{k_0}{2} \int_{X_w}^{X_f} \frac{dX}{Xk(X)} + \frac{1}{2} \ln \frac{X_0}{X_f}. \quad (18)$$

Таким образом, значение скин-фактора как и полученные решения определяются четырьмя безразмерными параметрами: аналогом числа Дамкелера Da_m , исходным значением пористости m_0 , начальной концентрацией кислоты C_0 и безразмерным объемом закачки оторочки кислоты v .

При расчетах, в первую очередь, проанализированы зависимости эффективности воздействия от основных безразмерных чисел или критериев подобия. Рост объемов оторочки и начальной концентрации соляной кислоты в растворе приводят к монотонному росту эффективности воздействия. При увеличении начальной пористости продуктивность скважины в результате обработки монотонно снижется.

Но, как показано в диссертации, влияние числа Дамкелера не столь однозначно. На рис. 6 приведена расчетная зависимость эффективности воздействия от числа Дамкелера для решения нулевого и первого порядков реакции. Расчеты проводились при следующих значениях остальных безразмерных параметров: $m_0=0.15$, $C_0=0.15$, $\nu=95.54$, $\beta=0.604$, $\gamma=0.288$.

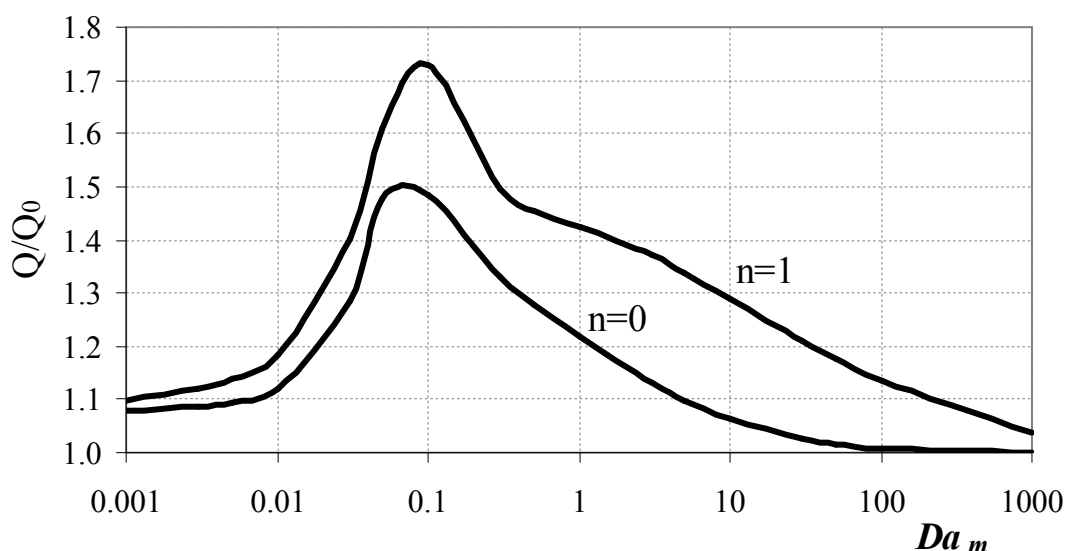


Рис. 6. Зависимость эффективности от числа Дамкелера

Рассмотрим приложение разработанной модели для прогнозирования и повышения эффективности соляно-кислотной обработки скважины в размерных величинах. Дальнейшие вычисления будут производиться в промышленных единицах измерения. Пусть пласт представлен доломитными отложениями начальной пористости 15%, его толщина составляет 10 м. Традиционные рекомендации по объему закачки кислоты предполагают использование 1-3 м³ раствора на метр перфорированной или продуктивной толщины. Приведем оценку эффективности процесса при закачке 10 м³ (соответствующий безразмерный объем составляет $\nu=31.8$) 15% раствора соляной кислоты в модельный пласт пористостью 15%. Прирост дебита скважины в результате воздействия, определяемый по формуле (17), согласно расчетным данным немонотонно зависит от числа Дамкелера и меняется от 1

(отсутствия эффекта от воздействия) до 1.35. Чтобы пересчитать эту зависимость в размерных параметрах, к примеру, в зависимости от объемной скорости закачки, кроме определенной в экспериментах константы поверхностной скорости реакции необходимо оценить удельную поверхность реакции. Для этого в формулу модельного числа Дамкелера (8) с учетом (9) можно подставить опубликованные данные лабораторных экспериментов на керне – $Q=1 \text{ см}^3/\text{мин}$, $V=115.6 \text{ см}^3$ [1], и вычислить удельную поверхность реакции при оптимальном значении числа Дамкелера:

$$S_r = \frac{\rho_i^0 Da q}{\sigma V} = 0.173.$$

В общем случае, удельная поверхность реакции будет значительно меняться в зависимости от формы образования "червоточин". Однако вблизи оптимальных значений числа Дамкелера можно принять данный параметр постоянной величиной.

На рис. 7 приведена расчетная зависимость прироста дебита скважины после воздействия при различных скоростях закачки раствора кислоты в скважину.

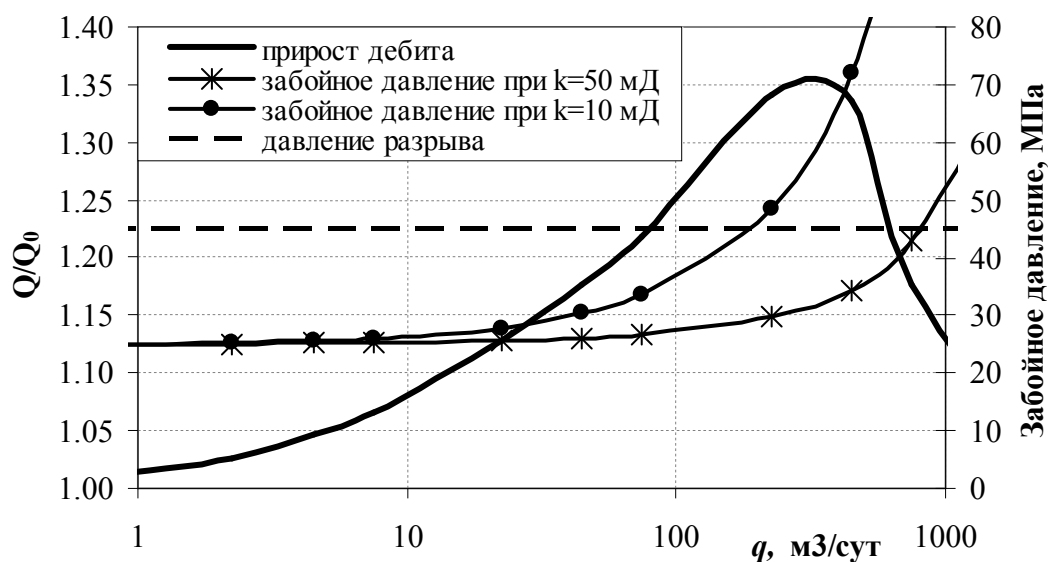


Рис. 7. Зависимость эффективности СКО и забойного давления от объемной скорости закачки раствора кислоты

Максимальное значение соответствует значению скорости закачки 260 м³/сут или модельному числу Дамкелера, равному 0.087. Этот случай соответствует значению скин-фактора скважины $s = -2.1$. Отметим, что высокие скорости закачки раствора приводят к значительному повышению давления на забое скважины. Если это значение превышает давление разрыва пласта, то процесс переходит в кислотный разрыв пласта и не описывается в рамках развиваемого приближения. Для расчета забойного давления использовалась формула Дююи. На рисунке 7 показана зависимость забойного давления от скорости закачки для начальной проницаемости пласта 50 и 10 мД. Как правило, для большинства нефтяных пластов, залегающих на глубинах 2-3 км, давление разрыва породы находится в пределах 400-500 атм. Для этих условий, как видно из рисунка, оптимальный режим закачки без перехода в режим кислотного разрыва может быть достигнут лишь при значениях проницаемости 50 мД.

Важным технологическим параметром процесса, помимо скорости закачки кислоты, является концентрация раствора. Рассмотрены варианты закачки, в которых общая масса кислоты является постоянной, а ее концентрация в растворе и, соответственно, объем самого раствора меняется. Анализировалось только максимальное значение прироста дебита при оптимальном числе Дамкелера. На рис. 8 сведены результаты этих исследований, где представлены зависимости от концентрации кислоты оптимальной скорости закачки раствора и соответствующего забойного давления при проницаемости 10 мД.

Проведенные исследования показывают, что при увеличении концентрации кислоты (при соответствующем уменьшении объема закачиваемой оторочки), оптимальная скорость закачки и забойное давление снижаются. Таким образом, для проницаемости 10 мД оптимальный режим закачки может быть реализован без перехода в кислотный гидроразрыв, если закачать такое же количество кислоты с концентрацией 20 %.

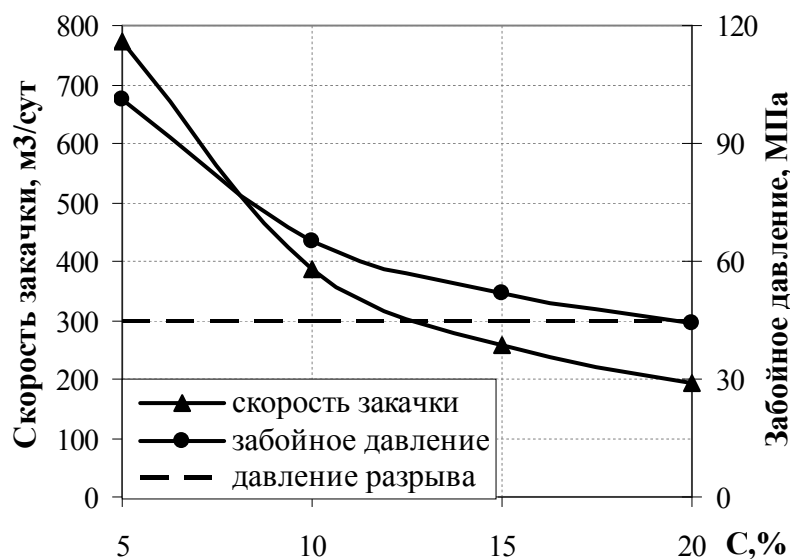


Рис. 8. Зависимость эффективности СКО от различной концентрации и объема закачки

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Установлено, что химическая реакция кислоты с минералами кальцитов и доломитов хорошо аппроксимируется уравнениями нулевого и первого порядков соответственно. Определены поверхностные константы реакции.

Построена линеаризованная физико-математическая модель кислотной обработки призабойной зоны скважины, получено аналитическое решение для распределения концентрации и пористости в призабойной зоне с учетом неравновесного течения реакции нулевого и первого порядка. Решение зависит от четырех безразмерных параметров.

Полученный безразмерный комплекс подобия Da_m , описывающий параметры макросистемы, выражается через число Дамкелера, определяющее особенности процесса в рамках микромасштаба.

Разработана петрофизическая модель, связывающая пористость и проницаемость породы после кислотной обработки, которая учитывает явления образования "червоточин" в пористой среде.

Показано, что эффективность кислотных обработок зависит от порядка скорости реакции, начальной концентрации, объема закачиваемой оторочки и достигает максимума при определенных скоростях закачки.

Рассмотрены случаи, когда оптимальный режим закачки требует создания забойного давления, превышающего давление разрыва горной породы. В этом случае процесс кислотной обработки переходит в кислотный гидроразрыв.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Смирнов А.С., Федоров К.М., Шевелев А.П. Математическое моделирование кислотной обработки карбонатных горных пород // Вестник Тюменского государственного университета. – 2008. – №6. – С.85-90.

2. Смирнов А.С., Федоров К.М., Шевелев А.П. О моделировании кислотного воздействия на карбонатный пласт // Известия РАН. Серия МЖГ. – 2010. – № 5. – С.114–121.

3. Смирнов А.С., Федоров К.М., Кремлева Т.А. Воздействие кислот на карбонаты: интеграция результатов микро- и макро моделирования явления образования "червоточин" // Тезисы докладов российской конференции "Многофазные системы: природа, человек, общество", посвященной 70-летию академика Р.И. Нигматулина. – Уфа: Институт механики УНЦ РАН, 2010 – С. 177-178.

4. Федоров К.М., Смирнов А.С., Кремлева Т.А. Carbonate acidizing: conjunction of macro and micro scale investigations // Материалы российской технической нефтегазовой конференции и выставки SPE. – Москва, 2010 – № 136409.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fredd C.N., Fogler H.S. Optimum Conditions for Wormhole Formation in Carbonate Porous Media: Influence of Transport and Reaction // SPE Journal. – 1999. – V. 4. – № 3. – P.196-205.