

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.2.177-192>

EDN WHRSSV

УДК 622.276.63

Управление кинетикой и реологией кислотных систем для совершенствования кислотных обработок скважин

Маннанов И.И., Ганиева Г.Р., Фаизов А.Р., Гимаева А.Р.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Controlling the kinetics and rheology of acid systems to improve acid well treatments

I.I. Mannanov, G.R. Ganieva, A.R. Faizov, A.R. Gimaeva

Kazan Federal University, Kazan, Russia

E-mail: gguzelrafikovna@mail.ru

Аннотация. В карбонатных коллекторах по различным оценкам мировые запасы углеводородов составляют от 38% до 60%. Характерной особенностью разработки месторождений карбонатных коллекторов является сложность управления процессами фильтрации обусловленной структурой пустотного пространства матрицы карбонатных пород коллекторов.

В составе пустотного пространства по геометрическим критериям, могут быть выделены: пористость (межзерновая пористость), кавернозность (межагрегатная пористость), трещиноватость. Причем в карбонатных породах могут встречаться различные сочетания видов пустотного пространства: порово-кавернозные, порово-трещиноватые, поровокавернозно-трещиноватые и другие коллекторы [1].

Сильная дифференцированность свойств коллектора создает определенные сложности в выполнении традиционных для разработки карбонатных коллекторов технологий кислотного воздействия на пласты. Карбонатные минералы активно взаимодействуют с большинством неорганических и органических кислот. Традиционно для кислотных обработок применяются растворы соляной кислоты с концентрацией 10–15%, что связано с ее высокой растворяющей способностью и низкой стоимостью. С целью проведения кислотных обработок продуктивных пластов применяют сложные композиции на основе соляной кислоты с различными компонентами, позволяющими регулировать свойства. При этом характерными признаками, описывающими процесс растворения, является скорость реакции и константа реакции. Одним из решений, поз-

воляющих получить физические значения скорости и кинетики растворимости является использование волюметрического метода оценки. Использование данного метода предусматривает изучение темпа выделения углекислого газа в процессе реакции с последующей обработкой данных. В работе был использован один из вариантов исполнения оборудования для автоматизированного получения данных, отражающих темп выделения углекислого газа при протекании химической реакции установка «ПИК-ОСГ» АО «Геологика».

Ключевые слова: карбонатный коллектор, пористость, фильтрация, соляная кислота, пласт, скорость реакции, кинетика, углекислый газ

Для цитирования: Маннанов И.И., Ганиева Г.Р., Фаизов А.Р., Гимаева А.Р. Управление кинетикой и реологией кислотных систем для совершенствования кислотных обработок скважин // Нефтяная провинция.-2024.-№2(38).-С. 177-192. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.2.177-192>. - EDN WHRSSV

Abstract. According to various estimates, the world hydrocarbon reserves in carbonate reservoirs range from 38% to 60%. A characteristic feature of carbonate reservoirs field development is the complexity of controlling filtration processes caused by the structure of the void space of the carbonate matrix of reservoir rocks.

According to geometrical criteria, the following can be distinguished in the void space: porosity (intergranular porosity), cavernousness (intergranular porosity), fracturing. Moreover, in carbonate rocks, various combinations of void space types can occur: pore-cavernous, pore-cracked, pore-cavernous-cracked, pore-cavernous-cracked and other reservoirs [1].

The strong differentiation of reservoir properties creates certain difficulties in performing conventional acid stimulation techniques for carbonate reservoir development. Carbonate minerals actively interact with most inorganic and organic acids. Traditionally, 10-15% hydrochloric acid solutions are used for acid treatments due to its high solubility and low cost. In order to carry out acid treatments of productive formations, complex compositions based on hydrochloric acid with various components allowing to regulate the properties are used. In this case, the characteristic features describing the dissolution process are the reaction rate and the reaction constant. One of the solutions to obtain physical values of solubility rate and kinetics is the use of volumetric estimation method. The use of this method involves the study of the rate of carbon dioxide release during the reaction process with subsequent data processing. In the work was used one of the versions of equipment for automated data acquisition reflecting the rate of carbon dioxide release during the chemical reaction installation “PIK-OSG” JSC “Geologika”.

Key words: carbonate reservoir, porosity, filtration, hydrochloric acid, reservoir, reaction rate, kinetics, carbon dioxide

For citation: I.I. Mannanov, G.R. Ganieva, A.R. Faizov, A.R. Gimaeva Upravlenie kinetikoj i reologiej kislotnyh sistem dlya sovershenstvovaniya kislotnyh obrabotok skvazhin [Controlling the kinetics and rheology of acid systems to improve acid well treatments]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(38), 2024. pp. 177-192. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.2.177-192>. EDN WHRSSV (in Russian)

1. Введение

Современные решения в области кислотных обработок карбонатных коллекторов основаны на предварительном составлении дизайна обработки. Ключевыми подходами в составлении дизайна обработки скважин является получение корректных исходных данных для моделирования [2-4].

Дизайн кислотной обработки призабойной зоны пласта (КО ПЗП) определяется, главным образом, тремя параметрами: скоростью поверхностной реакции, диффузией кислоты и скоростью закачки кислоты. Для любого имеющегося набора пластовых условий существует критическая скорость закачки кислоты. Если скорость закачки ниже критической, то происходит компактное растворение поверхности породы, если же больше, то наблюдается образование канала (каналов) растворения, называемых wormholes – червоточины.

По ряду экспериментальных результатов, полученных на карбонатных кернах, минимальный расход КС (как отношение объема КС к поровому объему керна) для получения сквозного канала кислотного растворения в кернах соответствует определенному темпу его нагнетания. Минимальный расход КС увеличивается соответственно с длиной керна, температурой, концентрацией кислоты и проницаемостью керна. Практическое использование оптимального технологического режима нагнетания КС в поровый карбонатный коллектор предусматривает формирование им канала (каналов) растворения с достижением максимальной глубины при минимальном объемном расходе. Стендовыми испытаниями на линейных моделях поровых пластов установлено формирование одного доминирующего канала растворения. Зарубежные исследователи считают, что низкий темп нагнетания КС соответствует компактному растворению ПЗП, средний – началу формирования каналов, а высокий – их прогрессирующему растворению [4, 5].

2. Материалы и методы исследований

Важной составляющей в определении оптимального режима кислотной обработки являются кинетические параметры протекания реакции, которые могут быть определены только из экспериментов [6, 7].

Измерение кинетических показателей реакции породы с кислотным составом является неизбежным шагом при разработке проекта кислотной интенсификации притока.

В настоящее время существует целый комплекс решений, направленных на управление характеристикой кислотных систем. Основными регулируемыми параметрами при использовании управляемых кислотных систем являются: совместимость кислотных систем с пластовыми флюидами, исключение любых возможных осадков при взаимодействии кислотных систем с пластовым флюидом, управление кинетикой процесса взаимодействия и управление реологией кислотных систем.

Ключевым механизмом воздействия на коллектор при кислотном воздействии является растворение минералов, слагающих продуктивный пласт. При этом характерными признаками, описывающими процесс растворения, является скорость реакции и константа реакции. Одним из решений, позволяющих получить физические значения скорости и кинетики растворимости является использование волюметрического метода оценки. Использование данного метода предусматривает изучение темпа выделения углекислого газа в процессе реакции с последующей обработкой данных. В работе был использован один из вариантов исполнения оборудования для автоматизированного получения данных отражающих темп выделения углекислого газа при протекании химической реакции установка «ПИК-ОСГ» АО «Геологика».

Реакцию между кислотой и карбонатной породой в основном принято делить на три этапа:

- первый этап ионы H^+ достигают поверхности породы посредством массообмена;
- второй этап ионы H^+ достигающие поверхности породы, химически реагирует с карбонатными минералами;
- третий этап Ca^{2+} образуется в результате реакции кислоты с породой, и продукты реакции удаляются от поверхности породы посредством массопереноса [8].

3. Результаты

Полученные в ходе экспериментов кинетические кривые описываются уравнением Авраами-Ерофеева (растянутой экспоненты), характеризующим кинетику топохимических процессов, проходящих в неоднородных средах.

$$V_t = V_0(1 - e^{-kt^n}) \quad (1)$$

где V_0 – суммарный объем углекислого газа, выделившегося в процессе реакции;

V_t – текущий объем углекислого газа, выделившегося в процессе реакции;

k – константа реакции.

В данном уравнении показатель степени n может служить мерой анизотропности среды. Учитывая, что исследование проводится в размотой породе, в связи с этим степень анизотропности можно принять равной 1.

Анализ литературных данных и сравнение результатов, выполненных исследований на химически чистых реагентах, с известными значениями констант реакций показывают высокую сходимость результатов с данными получаемыми на установке «ПИК ОСГ» [9, 10]. Так, например, для соляной кислоты были получены зависимости, отражающие изменение константы реакции при изменении концентрации кислот и температурных

условий. Характеристика изменения константы реакции по результатам выполненных исследований (синие точки) и данные из литературных источников (красные точки) при температурах 20-23°C отражены на рис. 1.

В качестве объектов исследования были изучены процессы взаимодействия на образцах, состоящих на 99% из кальцита и на 1% из кварца с химически чистой соляной кислотой HCL различной концентрацией и при различных термодинамических условиях.

Превышение исходной концентрации соляной кислоты $\approx 23 \div 25\%$ резко уменьшает скорость реакции с карбонатами из-за уменьшения диссоциации и повышения в растворе концентрации хлористого кальция (по мере нейтрализации кислоты), т.е. так называемого влияния общего иона.

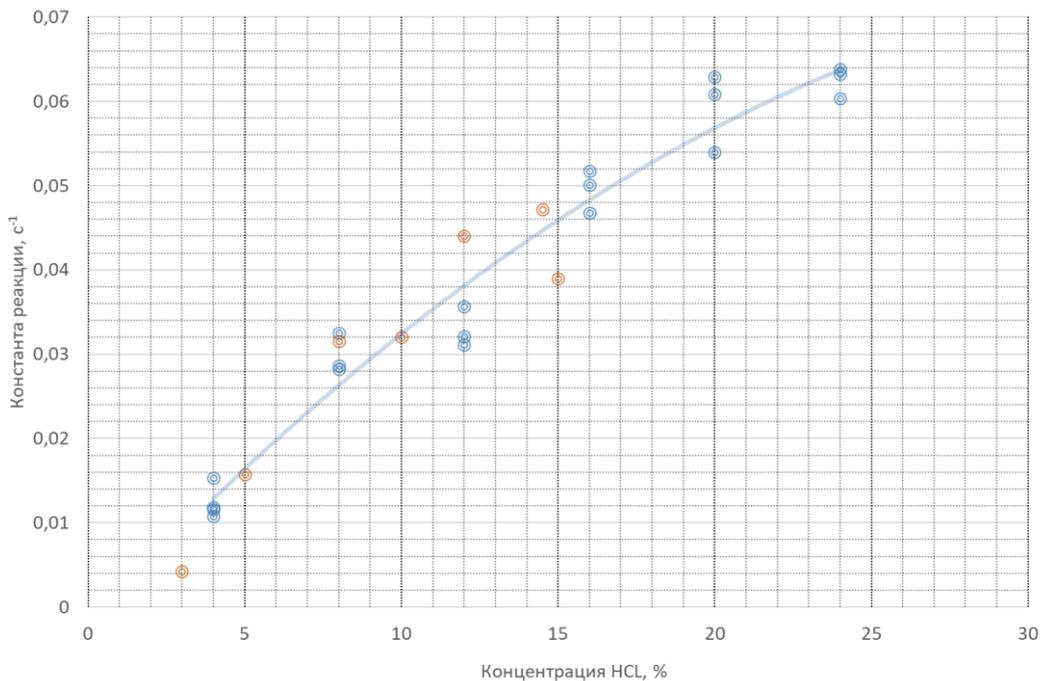


Рис. 1. Сопоставление результатов изучения влияния концентрации кислотных составов на кинетику процесса взаимодействия

В качестве первого приближения все исследования были выполнены на очищенном от углеводорода и промытом размолотом керне.

В то же время необходимо отметить, что влияние насыщения нефтью породы может значительно отразиться на кинетике процесса [11] за счет влияния диффузии кислотного состава через пленку нефти на карбонатном

коллекторе. Оценка влияния диффузии на скорость реакции может осуществляться с помощью фактора диффузионного торможения, в данном случае равного отношению максимальных скоростей реакции в нефте- и водонасыщенной среде:

$$f_D = \left(\frac{dV_{CO_2}}{dt} \right)_{\max, \text{нефть}} \quad f_D = \left(\frac{dV_{CO_2}}{dt} \right)_{\max, \text{вода}} \quad (2)$$

Пленка нефти на поверхности карбонатной породы значительно тормозит скорость растворения в соляной кислоте. Константа реакции в насыщенном коллекторе значительно уменьшается за счет обволакивания нефтью породы. Данное явление связано это с диффузионными процессами в начальной стадии реакции, так как в первую очередь в реакцию с кислотой вступает пропитанный нефтью слой породы.

Перспективными решениями регулирования процессов является применение ПАВ систем, позволяющих снизить поверхностное натяжение на границе раздела фаз и повлиять на фактор диффузионного торможения. Предпочтение при использовании данных систем получили саморегулируемые кислотные композиции на основе вязкоупругих поверхностно активных веществ ВУПАВ.

Вязкоупругие системы одновременно обладают свойствами, как упругого тела, так и вязкой жидкости. При быстром внешнем воздействии (малых временах воздействия) вязкоупругие материалы проявляют свойства упругого твердого тела, а при медленных воздействиях (при больших временах воздействия) – свойства вязких жидкостей.

Стоит отметить, что трехмерные вязкоупругие структуры ПАВ образуются не за счет сильных химических взаимодействий, а относительно слабых нековалентных сил межмолекулярного взаимодействия и электростатического притяжения. Благодаря этому при внешнем воздействии на вязкоупругую систему связи в ней не разрушаются, и после снятия нагрузки полностью восстанавливаются, тем самым делая систему стабильной.

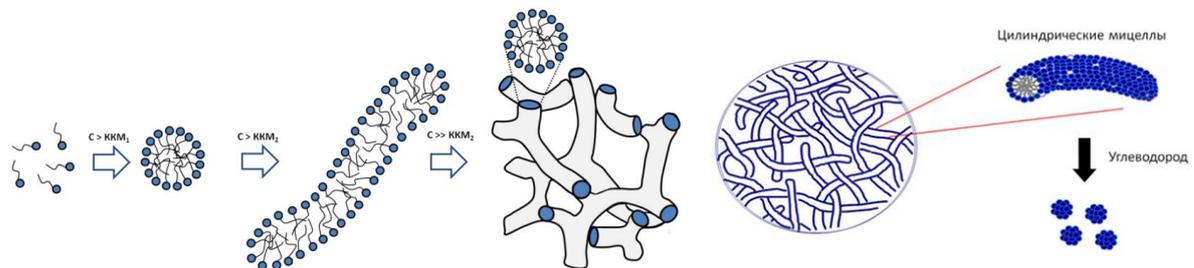
Полимерные цепи в свою очередь под действием приложенных сил могут безвозвратно разрушаться.

Известно, что вязкоупругие растворы ПАВ характеризуются высокой чувствительностью к внешним физическим факторам и присутствию других соединений: к температуре, к наличию в растворе электролитов и их концентрации, к присутствию полимеров, наночастиц и ПАВ других классов.

Благодаря высоким вязкостным и упругим свойствам, а также наличию широкого спектра методов, позволяющих достаточно легко и в широком диапазоне варьировать данными параметрами, растворы ВУПАВ стали широко применяться в различных областях промышленности.

В нефтегазодобывающей отрасли ВУПАВ нашли применение в качестве загустителей для жидкостей, применяемых в основных методах интенсификации нефтегазодобычи – гидравлического разрыва пласта и кислотных обработок.

Цилиндрические мицеллы, подобно полимерным цепям, способны переплетаться друг с другом, образуя сложную трехмерную сетку зацеплений (Рис. 2). За счет образования переплетенных мицеллярных структур раствор приобретает вязкоупругие свойства, а ПАВ, способные образовывать такие системы, называют вязкоупругими поверхностно-активными веществами (ВУПАВ).



Формирование вязкоупругой системы

Механизм разрушения вязкоупругой системы

Рис. 2. Иллюстрация этапов формирования и механизма разрушения переплетенных цилиндрических мицелл ПАВ в вязкоупругой системе

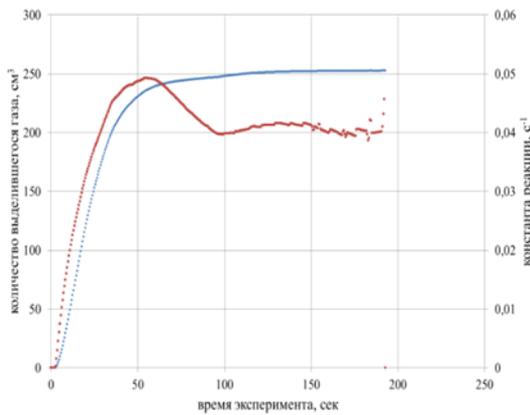
Эффективное использование ВУПАВ в нефтегазодобывающей отрасли также объясняется их способностью к саморазрушению при контакте с углеводородами. При взаимодействии прямой цилиндрической мицеллы с нефтью происходит солубилизация углеводородов в ядро мицеллы. В результате гидрофобные взаимодействия неполярных групп молекул ПАВ в мицелле ослабевают, цилиндрические мицеллы разрываются с образованием сферических, что в свою очередь снижает вязкость системы (Рис. 2).

Таким образом, деструкция вязкоупругой жидкости – это физический процесс, который осуществляется за счет изменения конфигурации мицеллы без разрушения самой молекулы.

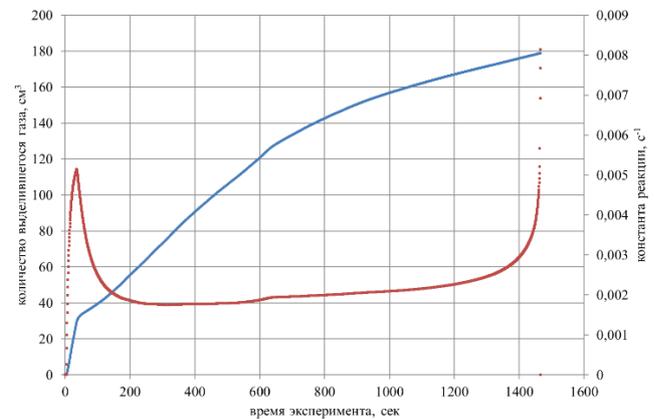
Важным моментом в моделировании кислотных систем с изменяемыми параметрами кинетики взаимодействия и изменяемой реологии является правильная интерпретация данных закладываемых в планируемый дизайн обработки. С целью получения данных отражающих динамику изменения подобных систем была выполнена серия экспериментальных работ по тестированию самоотклоняющихся кислотных композиций с содержанием ВУПАВ. В качестве базовых тестируемых реагентов наряду с химически чистой соляной кислотой были протестированы самоотклоняющиеся кислотные системы «Сурфакс-3» (ООО «СурфаХим»), «STIM» (ООО «СтимВелл»).

Лабораторные исследования предусматривали тестирование кинетики по методике аналогичной исследованиям химически чистых кислотных систем. При тестировании кислотных систем с ВУПАВ характерным является наличие ярко выраженной зоны начала реакции (зона наиболее интенсивного изменения свойств системы) и зона стабилизации кинетики (по видимому зона уже сформировавшейся вязкой структуры). На рис. 3 приводятся характерные результаты тестов. Главной особенностью процесса является продолжительность реакции 1 грамма породы естественного

насыщения, взаимодействие которой в кислотных системах с ВУПАВ происходит на протяжении 20-25 минут, а в системе с химически чистой соляной кислотой той же концентрации продолжительность реакции составляет порядка 2,5-4 минут.



Результаты эксперимента на ХЧ соляной кислоте 15%



Результаты эксперимента на композиции «STIM» (основа 15% соляная кислота)

Рис. 3. Результаты интерпретации данных эксперимента на установке ПИК ОСГ

Сравнительная характеристика расчетных значений кинетики процесса взаимодействия кислотных систем с породой приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения константы реакции кислотных систем

Химически чистая соляная кислота HCl 15%	Кислотная композиция STIM (основа HCl 15%)	Кислотная композиция СурфаХим (основа HCl 15%)
Расчетное значение константы реакции, с ⁻¹		
0,0470	0,0076	0,0300
0,0482	0,0082	0,0296
0,0424	0,0079	0,0301
0,0491	0,0805	0,0331

4 Дискуссия

Исходя из проделанных экспериментов, можно отметить широкий диапазон возможностей регулирования кинетики процесса и взаимодей-

ствия породы с кислотой. Образование вязкой структуры в процессе реакции сильно тормозит процесс взаимодействия кислоты на границе с породой. При этом можно отметить, что кинетика реакции выступает как индикатор образования вязкой структуры. Исходя из полученных данных, можно констатировать, что совместное участие реологии и кинетики значительно усложняет процесс моделирования и составления дизайна, т.к. характеристики системы выражаются в виде динамических параметров, изменяемых в процессе протекания реакции.

Изучение динамики изменения вязкости системы при нейтрализации кислотных систем также было изучено по результатам моделирования истощения кислоты за счет ее взаимодействия с карбонатом кальция. В растворе кислотных систем ВУПАВ вводили расчетное количество карбоната кальция, моделируя «истощение» (нейтрализацию) кислоты в процессе ее реакции с карбонатной породой.

Для каждого из кислотных систем проводились измерения вязкости на ротационном вискозиметре Fungilab Viscolead One L с кислотостойкими адаптерами при пластовой температуре (25°C). По получаемым значениям вязкости строился график зависимости вязкости КС ВУПАВ от %-нейтрализации (от 0 до 100%).

При оценке степени набора вязкости производилось измерение при различных скоростях сдвига, что позволило наблюдать зависимость вязкости реагентов от скорости сдвига и определить их реологические свойства. Рассматривались скорости сдвига от 5,6 до 8,4 с⁻¹. Данный диапазон скоростей сдвига в промышленных условиях эквивалентен условию обработки удаленных зон призабойной зоны.

Характерные результаты определения набора вязкости от степени гашения для составов «Сурфакс-3» и «СКС серии STIM» отображены на рис. 4.

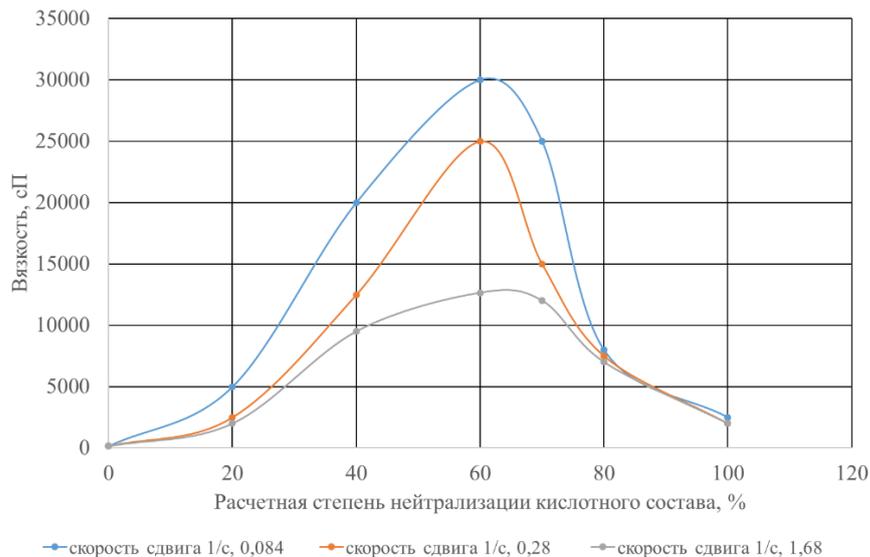


Рис. 4. Характеристика изменения вязкости кислотного состава с ВУПАВ при ее нейтрализации

Важной характеристикой процесса изучения реологии является время, в течение которого осуществляется замер вязкости, т. к. было отмечено, что на нефтенасыщенном керне несмотря на образование густой высоковязкой пены в процессе нейтрализации кислоты в последующем происходит ее разрушение со значительным падением вязкости. При нейтрализации кислотных систем экстрагированной породой степень падения вязкости системы даже после разрушения пены значительно ниже и сохраняется на протяжении длительного времени, т.е. система работает селективно, обеспечивая изоляцию водонасыщенных интервалов. При контакте с моделью пластовой воды раствор не подвергается деструкции и сохраняет свои свойства.

Заключение

По результатам экспериментов отмечается сильная дифференцированность реологических характеристик системы в зависимости от скорости сдвига. Уменьшение скорости продвижения кислотного состава в границах призабойной зоны может значительно сократить глубину проникновения состава за счет формирования вязкой структуры. При этом управление

кислотной системой в первую очередь должна достигаться скоростью закачки кислотного состава. Одновременный учет кинетики и динамики изменения реологии систем в режиме ввода кислотного состава играет самую важную роль в достижении эффективной глубины обработки. Процесс пенообразования, сопровождающий формирования вязкой структуры, играет значительную роль в применении ВУПАВ кислотных систем. Эффективная кислотная обработка согласно полученным данным должна сочетать условия возможности комбинации кислотных систем с саморегулируемой реологией и применением системы с низкой вязкостью.

Список литературы

1. Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа. – М.: Изд-во МГУ. – 2004. – 415 с.
2. Шарифуллин А.Р. Математическое моделирование кислотных обработок скважин в слоисто-неоднородных карбонатных коллекторах: диссертация кандидата технических наук: 01.02.05 / Шарифуллин Андрей Ришадович; [Место защиты: Башкир. гос. ун-т]. – Уфа, 2010.- 138 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/976.
3. Новиков В.А. Обоснование технологических параметров проведения кислотных обработок в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений Пермского края: диссертация кандидата технических наук: 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений/ Новиков Владимир Андреевич [Место защиты: «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»]. – Пермь, 2023.- 163 с.
4. Хузин Р.А. Моделирование процесса кислотных обработок карбонатных коллекторов с учетом комплексного строения околоскважинных зон: автореферат диссертации 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений/ Хузин Ринат Альвертович [Место защиты: «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»]. – Пермь, 2023.- 19 с.
5. Глущенко В.Н., Пташко О.А. Фильтрационные исследования новых кислотных составов для обработки карбонатных коллекторов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 46–56.
6. Кремлева Т.А., Смирнов А.С., Федоров К.М. Моделирование процесса кислотной обработки карбонатных пластов с учетом эффекта образования каналов червоточин Изв. РАН. Механика жидкости и газа, № 5. – 2011.
7. Андреев О.В., Антонов С.М., Киселёв К.В. Взаимодействие вязких растворов HCL с кальцитом и доломитом в условиях высокой минерализации//Вестник СПбГУ. Сер. 4. Физика. Химия. Т. 3 (61). - 2016. -Вып. 3.
8. Motta A.B.G., Thompson R.L., Favero J.L., Dias R.A.C., Silva L.F.L.R., Costa F.G, Schwalbert M.P. Rheological effects on the acidizing process in carbonate reservoirs J. Pet. Sci. Eng., 207 (2021), Article 109122, 10.1016/j.petrol.2021.109122

9. Солодовников А.О. Взаимодействие растворов кислотообразующих реагентов с карбонатными породами и их фильтрация в модели пласта // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук, 02.00.04., Тюменский государственный университет» Тюмень – 2013. – 24 с.
10. Хлебников В.Н. Кинетические закономерности взаимодействия кислотных растворов с карбонатной породой нефтяного месторождения // Вестник казанского химико-технологического института. 2003. С. 282–288.
11. Смыков В.В. Повышение эффективности добычи и подготовки нефти из карбонатных коллекторов (на примере месторождений НГДУ «Ямашнефть») // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук автореферат диссертации 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений/[Место защиты: «Башкирский научно-исследовательский и проектный институт нефти ОАО «АНК Башнефть» ДООО «Башнипинефть»]. – Уфа, 2001.- 24 с.

References

1. Bazhenova O.K., Burlin YU.K., Sokolov B.A., Hain V.E. *Geologiya i geokhimiya nefi i gaza* [Geology and geochemistry of oil and gas]. M.: Izd-vo MGU. 2004. 415 p. (in Russian)
2. Sharifullin A.R. *Matematicheskoe modelirovanie kislotnyh obrabotok skvazhin v sloistoneodnorodnyh karbonatnyh kollektorah* [Mathematical modelling of acid well treatments in layered inhomogeneous carbonate reservoirs]: dissertaciya kandidata tekhnicheskikh nauk: 01.02.05 / Sarifullin Andrej Rishadovich; [Mesto zashchity: Bashkir. gos. un-t]. Ufa, 2010. 138 p.: il. RGB OD, 61 11-5/976. (in Russian)
3. Novikov V.A. *Obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov provedeniya kislotnyh obrabotok v karbonatnyh kollektorah neftyanyh mestorozhdenij Permskogo kraja* [Justification of technological parameters of acid treatments in carbonate reservoirs of oil fields of the Perm Territory]: dissertaciya kandidata tekhnicheskikh nauk: 2.8.4. Razrabotka i ekspluatatsiya neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij/ Novikov Vladimir Andreevich [Mesto zashchity: «Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet»]. Perm, 2023.163 p. (in Russian)
4. Huzin R.A. *Modelirovanie processa kislotnyh obrabotok karbonatnyh kollektorov s uchetom kompleksnogo stroeniya okoloskvazhinnyh zon* [Modelling the process of acid treatment of carbonate reservoirs taking into account the complex structure of near-wellbore zones]: avtoreferat dissertacii 25.00.17 – Razrabotka i ekspluatatsiya neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij/ Huzin Rinat Al'vertovich [Mesto zashchity: «Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet»]. Perm, 2023.19 p. (in Russian)
5. Glushchenko V.N., Ptashko O.A. *Fil'tracionnye issledovaniya novyh kislotnyh sostavov dlya obrabotki karbonatnyh kollektorov* [Filtration studies of new acid formulations for treatment of carbonate reservoirs]// Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo. 2014.No 11. Pp. 46–56. (in Russian)
6. Kremleva T.A., Smirnov A.S., Fedorov K.M. *Modelirovanie processa kislotnoj obrabotki karbonatnyh plastov s uchetom effekta obrazovaniya kanalov chervotochin* [Modelling the process of acid treatment of carbonate formations taking into account the effect of wormhole channel formation] Izv. RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza, № 5. 2011. (in Russian)
7. Andreev O.V., Antonov S.M., Kiselyov K.V. *Vzaimodejstvie vyazkih rastvorov HCL s kal'citom i dolomitom v usloviyah vysokoj mineralizacii* [Interaction of viscous HCL solutions with calcite and dolomite under high mineralisation conditions]//Vestnik SPbGU. Ser. 4. Fizika. Himiya. T. 3 (61). 2016. Vyp. 3. (in Russian)

8. Motta A.B.G., Thompson R.L., Favero J.L., Dias R.A.C., Silva L.F.L.R., Costa F.G., Schwalbert M.P. Rheological effects on the acidizing process in carbonate reservoirs J. Pet. Sci. Eng., 207 (2021), Article 109122, 10.1016/j.petrol.2021.109122.
9. Solodovnikov A.O. *Vzaimodejstvie rastvorov kislootoobrazuyushchih reagentov s karbonatnymi porodami i ih fil'traciya v modeli plasta* [Interaction of acid-forming reagent solutions with carbonate rocks and their filtration in a reservoir model]// Avtotoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata himicheskikh nauk, 02.00.04., Tyumenskij gosudarstvennyj universitet» Tyumen'. 2013. 24 p. (in Russian)
10. Hlebnikov V.N. *Kineticheskie zakonomernosti vzaimodejstviya kislotnyh rastvorov s karbonatnoj porodoj neftyanogo mestorozhdeniya* [Kinetic regularities of interaction of acid solutions with carbonate rock of an oil field] // Vestnik kazanskogo himiko-tehnologicheskogo instituta. 2003. P. 282–288. (in Russian)
11. Smykov V.V. *Povyshenie effektivnosti dobychi i podgotovki nefti iz karbonatnyh kollektorov (na primere mestorozhdenij NGDU «YAmashneft'»)* [Improving the efficiency of oil production and treatment from carbonate reservoirs (by the example of NGDU Yamashneft fields)] // Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk avtoreferat dissertacii 25.00.17 – Razrabotka i ekspluatatsiya neftnyah i gazovyh mestorozhdenij/[Mesto zashchity: «Bashkirskij nauchno-issledovatel'skij i proektnyj institut nefti OAO «ANK Bashneft'» DOOO «Bashnpineft'»]. Ufa, 2001. 24 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Маннанов Ильдар Илгизович, к.т.н., доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий - Казанский федеральный университет
Россия, 420011, Казань, ул. Кремлёвская, 4/5
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-5853-0205>
E-mail: ildarmannanov@mail.ru

Ганиева Гузель Рафиковна, к.т.н., доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий - Казанский федеральный университет
Россия, 420011, Казань, ул. Кремлёвская, 4/5
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-2892-7428>
E-mail: gguzelrafikovna@mail.ru

Фаизов Артур Рафикович, студент 4-го курса кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий - Казанский федеральный университет
Россия, 420011, Казань, ул. Кремлёвская, 4/5
E-mail: artur.faizov.2019@mail.ru

Гимаева Алина Рашитовна, к.т.н., доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий - Казанский федеральный университет
Россия, 420011, Казань, ул. Кремлёвская, 4/5
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-7546-406X>
E-mail: argimaeva@yandex.ru

Authors

I.I. Mannanov, Ph.D., Associate Professor, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies - Kazan Federal University

4/5, Kremlin Str., Kazan, 420011, Russian Federation

ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-5853-0205>

E-mail: ildarmannanov@mail.ru

G.R. Ganieva, Ph.D., Associate Professor, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies - Kazan Federal University

4/5, Kremlin Str., Kazan, 420011, Russian Federation

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-2892-7428>

E-mail: gguzelrafikovna@mail.ru

A.R. Faizov, student Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies - Kazan Federal University

4/5, Kremlin Str., Kazan, 420011, Russian Federation

E-mail: artur.faizov.2019@mail.ru

A.R. Gimaeva, Ph.D., Associate Professor, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies - Kazan Federal University

4/5, Kremlin Str., Kazan, 420011, Russian Federation

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-7546-406X>

E-mail: argimaeva@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.05.2024

Принята к публикации 19.06.2024

Опубликована 30.06.2024