



УДК 622.276.63

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИИ КАРБОНАТНОЙ ПОРОДЫ С СОЛЯНОЙ КИСЛОТОЙ НА УСТАНОВКЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ДИСКОМ

DETERMINATION OF KINETIC PARAMETERS OF THE REACTION BETWEEN CARBONATE ROCK AND HYDROCHLORIC ACID ON A ROTATING DISK APPARATUS

Сунагатова Элина Маратовна

магистрант кафедры «Разработка и эксплуатация
нефтяных и газонефтяных месторождений»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
elinasunagatova48@gmail.com

Гилимханов Данияр Венерович

магистрант кафедры «Разработка и эксплуатация
нефтяных и газонефтяных месторождений»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
daniar2351418@gmail.com

Лысенков Алексей Владимирович

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Разработка и эксплуатация
нефтяных и газонефтяных месторождений»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
rusoil.aleksey@mail.ru

Аннотация. В статье описываются экспериментальные исследования кинетических параметров реакции взаимодействия соляно-кислотной композиции с карбонатной горной породой на примере отложений башкирского яруса месторождений Башкортостана. Для исследования была использована установка с вращающимся диском, которая позволяет проводить исследование в условиях, максимально приближенных к пластовым. Полученные значения скоростей реакции и коэффициента диффузии могут быть использованы для прогнозирования эффективности кислотных обработок и выбора оптимальных параметров воздействия на пласт.

Ключевые слова: соляно-кислотная обработка, карбонатный пласт, реакционная активность, установка с вращающимся диском, скорость реакции, коэффициент диффузии.

Sunagatova Elina Maratovna

Master's student of the Department
Development and operation
of oil and gas-oil fields,
Ufa State Petroleum Technological University
elinasunagatova48@gmail.com

Gilimkhanov Daniar Venerovich

Master's student of the Department
Development and operation
of oil and gas-oil fields,
Ufa State Petroleum Technological University
daniar2351418@gmail.com

Lysenkov Alexey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Chair
Development and operation
of oil and gas-oil fields,
Ufa State Petroleum Technological University
rusoil.aleksey@mail.ru

Annotation. The article describes experimental studies of the kinetic parameters of the reaction between a hydrochloric acid composition and carbonate rock on the example of deposits from the Bashkirian stage in the Bashkortostan region. A rotating disc apparatus was used to conduct the research under conditions that closely resemble those of the reservoir. The obtained values of reaction rates and diffusion coefficients can be used to predict the efficiency of acid treatments and select optimal parameters for affecting the reservoir.

Keywords: acid treatment, carbonate reservoir, reaction activity, rotating disk apparatus, reaction rate, diffusion coefficient.

Соляно-кислотная обработка (СКО) является одним из наиболее распространенных и эффективных методов воздействия на призабойную зону карбонатного пласта [1]. В качестве основного процесса обработки скважин можно отметить растворение минералов горной породы и кольматантов за счет физико-химического воздействия кислоты. Это ведет к увеличению коэффициентов продуктивности добывающих и приемистости нагнетательных скважин путем увеличения размеров и очистки поровых каналов горных пород.

Одним из основных факторов, определяющим эффективность СКО, является глубина проникновения активного солянокислотного раствора в толщу продуктивного пласта, которая, в свою очередь, зависит от степени реакционной активности кислотного состава [2, 3]. Для достижения наилучшего результата воздействия важно обеспечивать продвижение реакционноспособной кислоты в наиболее удаленную от скважины зону. В противном случае, если нейтрализация солянокислотного раствора произойдет вблизи скважины, то могут произойти осложнения в виде растворения цементного камня с последующим риском возникновения заколонной циркуляции. Основными параметрами, определяющими реакционную способность кислоты, являются скорость реакции и коэффициент диффузии. Поэтому условием успешного про-



ведения СКО призабойной зоны пласта является подготовка в виде предварительных исследований по изучению кинетики взаимодействия кислоты с образцами горной породы.

Для изучения реакции взаимодействия солянокислотного состава с карбонатной горной породой была использована установка с вращающимся диском [4, 5]. Данная установка в отличие от других методов измерения кинетических параметров позволяет проводить исследования в условиях максимально приближенных к пластовым. В частности, с помощью изменения скорости вращения оцилиндрованного ядерного материала, в реакторе можно имитировать различные скорости закачки кислоты. Определение параметров реакции происходит за счет периодического отбора проб кислоты с последующим определением концентрации кальция и магния путем титрования.

Для исследования был выбран предварительно экстрагированный и осушенный образец известняка отложений башкирского яруса одного из месторождений Башкортостана. В качестве исследуемой кислотной композиции использовался реагент, который активно применяют на объектах данного месторождения, представляющий собой состав, состоящий из 15%-ой соляной кислоты, ингибитора коррозии и стабилизатора железа.

Эксперименты проводились при скоростях вращения равных соответственно 25, 50, 100, 250, 500 об/мин, поддерживая постоянными температуру и концентрацию кислоты. По результатам титрования были построены графики зависимостей суммарного количества выделившегося в ходе реакции кальция и магния от времени для различных скоростей вращения ядра. Пример графика для скорости равной 250 об/мин приведен на рисунке 1.

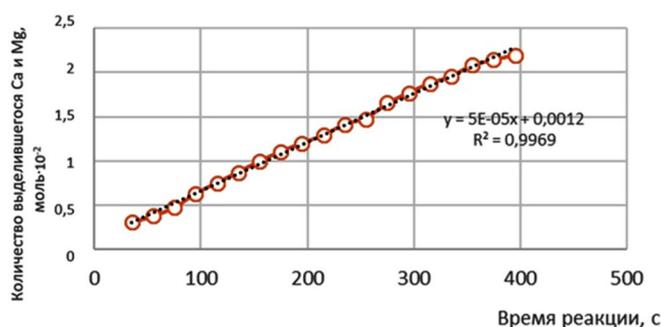


Рисунок 1 – Зависимость количества выделившегося в ходе реакции кальция и магния от времени при скорости вращения 250 об/мин

На представленном графике можем наблюдать прямолинейную зависимость суммарного количества кальция и магния от времени реакции. Соответственно, скорость реакции является постоянной величиной и может быть определена по следующей формуле:

$$J_{mt} = \frac{\text{angle}}{\pi \cdot d^2}, \tag{1}$$

где J_{mt} – скорость реакции, моль/(см²·с); angle – угол наклона на стабильном прямолинейном участке графика зависимости накопленного количества кальция от времени реакции; d – диаметр образца, см.

По результатам расчетов скорости реакции кислотного состава с карбонатной горной породой при различных скоростях вращения были получены результаты, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета скорости реакции кислотного состава с карбонатной горной породой

№	Скорость вращения, об/мин	Скорость реакции, моль/(см ² ·с)
1	25	$2,7873 \cdot 10^{-7}$
2	50	$9,0730 \cdot 10^{-7}$
3	100	$9,2694 \cdot 10^{-7}$
4	250	$2,1436 \cdot 10^{-6}$
5	500	$4,5251 \cdot 10^{-6}$

Для определения коэффициента диффузии было использовано уравнение, традиционно описывающее поток кислоты на поверхность породы:

$$J_{mt} = k_{mt}(C_b - C_s), \tag{2}$$

где J_{mt} – поток или скорость массопереноса, моль/(см²·с); k_{mt} – коэффициент массопереноса, см/с; C_b – концентрация ионов в объеме раствора, моль/см³; C_s – концентрация ионов у поверхности, моль/см³.

Коэффициент массопереноса для ньютоновской жидкости имеет вид:

$$k_{mt} = 0.62 \cdot D_e^{2/3} \cdot \nu^{-1/6} \cdot \omega^{1/2}, \tag{3}$$



где D_e – эффективный коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; ω – угловая скорость вращения диска, $\text{рад}/\text{с}$; ν – кинематическая вязкость, $\text{см}^2/\text{с}$.

Подставляя уравнение (3) в уравнение (2), была получено следующее выражение:

$$J_{mt} = 0.62 \cdot D_e^{2/3} \cdot \nu^{-1/6} \cdot \omega^{1/2} \cdot (C_b - C_s). \quad (4)$$

Для определения значения коэффициента диффузии введем вспомогательную функцию F , график зависимости F от корня квадратного угловой скорости вращения диска $\omega^{1/2}$ представляет собой прямую линию с углом наклона равным $D_e^{2/3}$:

$$F = \frac{J_{mt}}{0.62 \cdot \nu^{-1/6} \cdot C_b} = D_e^{2/3} \cdot \omega^{1/2}, \quad (5)$$

Через полученные значения функции F для каждого значения $\omega^{1/2}$ была получена линейная зависимость и определен угол наклона прямой $D_e^{2/3}$, из которого был рассчитан коэффициент диффузии D_e (рис. 2).

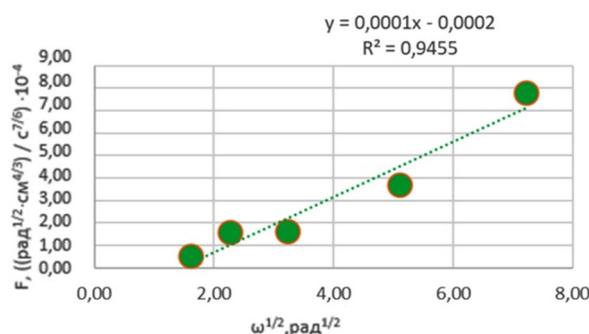


Рисунок 2 – График зависимости функции F от $\omega^{1/2}$

По результатам расчетов коэффициента диффузии кислотного состава с карбонатной горной породой при различных скоростях вращения были получен результат, составляющий $1,3734 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$.

По результатам проведенных исследований были определены скорости реакции кислотного состава с карбонатной горной породой, представляющей собой отложения башкирского яруса, при различных скоростях вращения диска и коэффициент диффузии. Полученные значения могут быть использованы в процессе моделирования кислотных обработок для прогнозирования их эффективности и выбора оптимальных параметров воздействия на пласт.

Список литературы:

1. Influence of transport conditions on optimal injection rate for acid jetting in carbonate Reservoirs / D. Ridner [et al.] // Society of Petroleum Engineers. – 2018.
2. Дмитриева А.Ю., Мусабилов М.Х., Батулин Н.И. Разработка и исследование физико-химических свойств кислотно-углеводородных эмульсионных систем для комплексных ОПЗ карбонатных коллекторов // Экспозиция Нефть Газ. – 2020. – № 1(74). – С. 50–55.
3. Мартюшев Д.А., Новиков В.А. Совершенствование кислотных обработок в коллекторах, характеризующихся различной карбонатностью (на примере нефтяных месторождений Пермского края) // Изв. Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 7–17.
4. Acid Stimulation Improvement with the Use of New Particulate Base Diverter to Improve Zonal Coverage in HPHT Carbonate Reservoirs / F. Moid [et al.] // International Petroleum Technology Conference. – 2020.
5. Mary S. Anderson. Reactivity of San Andres Dolomite // SPE Journal Paper 20115-PA. – 1991. – P. 73.

List of references:

1. Influence of transport conditions on optimal injection rate for acid jetting in carbonate reservoirs / D. Ridner [et al.] // Society of Petroleum Engineers. – 2018.
2. Dmitrieva A.Y., Musabirov M.Kh., Baturin N.I. Development and study of physical and chemical properties of acid-hydrocarbon emulsion systems for complex water shut-off of carbonate reservoirs // Exposition Oil Gas. – 2020. – № 1(74). – P. 50–55.
3. Martyushev D.A., Novikov V.A. Improvement of acid treatments in reservoirs characterized by different carbonate nature (on the example of oil fields of the Perm region) // Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources. – 2020. – V. 331. – № 9. – P. 7–17.
4. Acid Stimulation Improvement with the Use of New Particulate Base Diverter to Improve Zonal Coverage in HPHT Carbonate Reservoirs / F. Moid [et al.] // International Petroleum Technology Conference. – 2020.
5. Mary S. Anderson. Reactivity of San Andres Dolomite // SPE Journal Paper 20115-PA. – 1991. – P. 73.