

НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ

PETROLEUM ENGINEERING AND PROJECT MANAGEMENT

Научная статья

УДК 622.276

<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-59-64>

EDN TWSGBU

Основополагающие принципы подкисления матрицы в карбонатных коллекторах при добыче нефти

*Альберт Хамед-Харисович Нугманов[✉], Амир Амиржанович Джарканалиев,
Эльгам Заурович Исаналиев, Екатерина Владимировна Соколова*

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, albert909@yandex.ru[✉]*

Аннотация. Процесс кислотной обработки является одним из старейших методов, используемых для интенсификации скважин. Успех этой операции, наряду с некоторыми другими, позволил применять матричные кислотные обработки, которые могут быть адаптированы различными нефтедобывающими компаниями. Матричная кислотная обработка способствует улучшить или восстановить проницаемость области вблизи ствола скважины без гидроразрыва пласта и наиболее эффективна в тех случаях, когда необходимо поддерживать границы сланцевого разрыва и естественного потока, чтобы свести к минимуму добычу газа и воды для получения высокого процента добычи нефти без увеличения добычи газа или воды. Увеличение проницаемости уменьшит перепад давления, связанный с закачкой или добычей жидкости, за счет расширения поровой горловины или устранения повреждений пласта. Целью подкисления матрицы является достижение радиального проникновения кислоты в пласт за счет расширения поровых пространств или растворения повреждающих частиц из призабойных зон. В статье представлен обзор наиболее распространенных минеральных и органических кислот, применяемых в нефтепромысловой практике, а также промышленно разработанных кислотных составов. Обоснованы особенности их использования в зависимости от литологии пласта и термобарических условий. Подробно описан типовой пятистадийный процесс матричной кислотной обработки карбонатного коллектора, включающий очистку ствола скважины, предварительную промывку, основную кислотную обработку (с возможным применением методов отвода), промывку и вытеснение. Рассмотрен механизм взаимодействия кислоты с породой на молекулярном уровне, включающий перенос ионов водорода, их реакцию с кальцитом и доломитом, а также диффузию продуктов реакции. Отмечена ключевая роль температуры в регулировании скорости этих процессов.

Ключевые слова: добыча нефти, карбонатные коллекторы, матрица, подкисление, проникающая способность

Для цитирования: Нугманов А. Х.-Х., Джарканалиев А. А., Исаналиев Э. З., Соколова Е. В. Основополагающие принципы подкисления матрицы в карбонатных коллекторах при добыче нефти // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 2. С. 59–64. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-59-64>. EDN TWSGBU.

Original article

Fundamental principles of matrix acidification in carbonate reservoirs during oil production

*Albert Kh.-Kh. Nugmanov[✉], Amir A. Jarkanaliev,
Elgam Z. Isanaliev, Ekaterina V. Sokolova*

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, albert909@yandex.ru[✉]*

Abstract. The acid treatment process is one of the oldest methods used for well intensification. The success of this operation, along with some others, has opened the door to the use of matrix acid treatment, which can be adapted by various oil producing companies. Matrix acid treatment makes it possible to improve or restore the permeability of the area near the borehole without hydraulic fracturing and is most useful in cases where it is necessary to maintain the boundaries of shale fracturing and natural flow in order to minimize gas and water production to obtain a high percentage of oil production without increasing gas or water production. An increase in permeability will reduce the pressure drop associated with fluid injection or extraction by expanding the pore neck or eliminating damage to the formation. The purpose of acidification of the matrix is to achieve radial penetration of acid into the formation by expanding the pore spaces or dissolving damaging particles from the bottomhole zones. The article provides an overview of the most common mineral and organic acids used in oilfield practice, as well as industrially developed acid formulations. The features of their use depending on the lithology of the formation and thermobaric conditions are described. A typical five-stage process of matrix acid treatment of a carbonate reservoir is described in detail, including borehole cleaning, pre-rinsing, basic acid treatment (with possible application of extraction methods), flushing and displacement. The mechanism of acid-rock interaction at the molecular level, including the transfer of hydrogen ions, their reaction with calcite and dolomite, as well as the diffusion of reaction products, is considered. The key role of temperature in regulating the rate of these processes is noted.

Keywords: oil production, carbonate reservoirs, matrix, acidification, permeability

For citation: Nugmanov A. Kh.-Kh., Jarkanaliev A. A., Isanaliev E. Z., Sokolova E. V. Fundamental principles of matrix acidification in carbonate reservoirs during oil production. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;2:59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-59-64>. EDN TWSGBU.

Введение

Процесс кислотной обработки является одним из старейших методов, используемых для интенсификации скважин, и восходит к 1895 г., когда Г. Фреш и В. С. Ван Дайк наблюдали рост извлечения углеводородов в известняковом коллекторе на 300–400 % за счет успешной закачки соляной кислоты HCl [1–3]. Наряду с некоторыми другими успех этой операции открыл возможность применения матричной кислотной обработки, которая может быть адаптирована различными нефтедобывающими компаниями. Матричная кислотная обработка позволяет улучшить или восстановить проницаемость области вблизи ствола скважины без гидроразрыва пласта и наиболее эффективна в тех случаях, когда необходимо поддерживать границы сланцевого разрыва и естественного потока, чтобы свести к минимуму добычу газа и воды для получения высокого процента добычи нефти без увеличения добычи газа или воды. Увеличение проницаемости уменьшит перепад давления, связанный с закачкой или добычей жидкости, за счет расширения поровой горловины или устранения повреждений пласта [3–5].

Прирост добычи в результате кислотной обработки зависит от пластового давления и от того, по-

врежден ли пласт вблизи ствола скважины. В неповрежденном пласте прирост проницаемости от подкисления будет незначительным. Однако в случае его повреждения (естественного или искусственно-го) проницаемость может быть значительно увеличена до 10 или даже 100-кратности после устранения повреждений. В исключительных обстоятельствах заживление пласта матричной кислотой может дать значительную стимуляцию в неповрежденных зонах. Это может произойти в естественно разрушенных формациях, где кислота может распространяться вдоль существующих трещин [2, 5].

В добывающей скважине зона нарушенной проницаемости вблизи ствола скважины перекрывает сходящийся радиальный поток и резко снижает добычу. Целью подкисления матрицы является достижение радиального проникновения кислоты в пласт за счет расширения поровых пространств или растворения повреждающих частиц из призабойных зон. Матричное кислотование для обломочных и необломочных пород различается из-за разницы в литологии, т. к. кислота имеет разную склонность к этим двум типам. Для песчаника цель состоит в том, чтобы устраниить и свести к минимуму повреждение пласта, в то время как для кар-

бонатов возможно обойти повреждение пласта через индуцирование проточных каналов [3, 6, 7].

Реакция между карбонатом и кислотой ограничена массообменом, что означает, что скорость потребления кислоты на границе между породой и кислотой выше, чем массоперенос. В песчанике скорость реакции ограничена, т. к. массоперенос на границе раздела «порода – кислота» происходит быстрее, чем скорость реакции кислоты [3]. Это связано с тем, что кислота быстрее вступает в реакцию с карбонатами, чем песчаники, т. к. карбонаты имеют быструю скорость растворения и обеспечивают большую массу для растворения. В песчанике растворяется только промежуточный материал, в то время как составляющие, такие как кварц и полевой шпат, вступают в очень медленную реакцию с кислотой.

В статье рассмотрены карбонатные породы. Они имеют различную скорость растворения друг от друга и зависят от литологии и температуры [3–5].

Результаты и обсуждение

Известняк ограничен массопереносом при температурах выше 0 °C, в то время как доломит ограничен массопереносом при температурах выше 150 °C [3]. Кроме этого, доломиты менее пластичны и имеют

более медленную скорость реакции, чем известняк, и часто имеют несколько проницаемых зон. Матричное подкисление не подходит для коллекторов с пористостью более 35 % или для хрупких пластов, таких как меловые пласти. Важно определить, какой тип породы необходимо стимулировать, а также степень неоднородности в ней, что позволит правильно выбрать химический состав и оптимизировать его на этапе проектирования. Некоторые карбонатные породы являются чистыми и в отличие от других содержат кремнистые материалы. Компонентами могут быть кремнистые окаменелости, обломочные зерна кварца или глинистый материал. По мере увеличения концентрации кремнистого материала порода классифицируется как песчаный, кремнистый или глинистый известняк. Аналогичным образом, в случае двух карбонатных пород, известняка и доломитовых пород, которые могут быть переслаивающимися, содержание кальция в известняке могло бы частично быть заменено магнием [3, 6, 7]. Таким образом, порода классифицируется как магнезиальный или доломитовый известняк.

На рисунке представлены три взаимосвязанных химических фактора для выбора подходящей кислоты для конкретного заживления пласта.



Взаимосвязанные факторы, влияющие на выбор кислоты

Interrelated factors influencing the choice of acid

Стехиометрия – это соотношение между реагентами и продуктами реакции кислоты с материалами резервуара. Определяющим параметром в стехиометрии является растворяющая способность кислоты, поскольку она отражает ее способность растворять определенный материал. Такая способность зависит от таких факторов, как концентрация и прочность кислоты, а также от природы растворяемого материала. Более высокая растворяющая способность означает, что кислота может растворять больше материала на единицу объема.

Термодинамическое равновесие – это состояние в химической реакции, при котором прямые и об-

ратные реакции протекают с одинаковой скоростью, что приводит к отсутствию чистого изменения концентраций реагентов и продуктов, что может ограничить степень реакции и помешать полному использованию реагентов. Термодинамическое равновесие может быть достигнуто во многих кислотных реакциях до того, как кислота полностью вступит в нее, особенно в случае реакции органических кислот с известняковыми и доломитовыми образованиями. Учет равновесия контролирует осаждение продуктов реакции, которые могут свести к нулю преимущества обработки в карбонатных формациях.

Время, затрачиваемое кислотой на геометрию резервуара, в пределах которого протекает реакция, позволяет оценить расстояние проникновения кислоты.

Кислота, используемая во время любой операции кислотной обработки, зависит от различных факторов, таких как температура, стабильность, литология, растворяющая способность, скорость реакции и продукты, образующиеся с использованием этой кислоты. Кислоты используются как отдельно, так и в виде смесей с учетом условий. В целом, кислоты, используемые для любого процесса стимуляции, относятся к одному из двух типов: минеральным и органическим кислотам. Соляная кислота HCl и фтористоводородная кислота HF являются примерами минеральных кислот, широко используемых в промышленности. Органические кислоты, которые активно применяются, – муравьиная и уксусная. Кроме того, используются промышленно разработанные кислоты, такие как хлоруксусная и сульфаминовая [3, 8].

Кислотная обработка карбонатных пород, таких как известняк CaCO_3 и доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, проводится с использованием соляной кислоты. Фтористоводородная кислота не используется на карбонатных образованиях, т. к. она вступает в неблагоприятную реакцию, в результате которой образуется нерастворимый фторид кальция.

Для образований из песчаника используется смесь соляной и плавиковой кислот – широко известная грязевая кислота. Фтористоводородная кислота способна растворять кварц и глину, но используется в небольших количествах, в пределах 1,5–3 %. Соляная кислота, не вступая в реакцию с песком или глиной, используется для растворения кальцита, содержащегося в песчанике, а также для поддержания низкого уровня pH в пласте с целью предотвращения образования осадков из-за реакции фтористоводородной кислоты с пластом [3, 9].

Муравьиная и уксусная кислоты стабильны при высоких температурах, поэтому их применяют в таких условиях, когда реакционная способность соляной кислоты увеличивается, и она не может проникнуть до целевой зоны для создания проточного канала. Однако органические кислоты имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что они достигают равновесия до того, как будут полностью использованы. Кроме этого, уксусная и муравьиная кислоты имеют более слабую растворяющую способность по сравнению с соляной кислотой и являются дорогостоящими, следовательно, они используются в небольших количествах [3, 8].

Кислоты промышленного производства ценятся за их портативность из-за предотвращения чрезмерного использования транспорта и перекачки, однако они дорогостоящие и поэтому используются редко.

Типичный процесс матричной кислотной обработки состоит из пяти этапов:

- 1) очистка ствола скважины;
- 2) предварительная промывка;
- 3) отвод основной кислотной обработки;
- 4) промывка;
- 5) вытеснение.

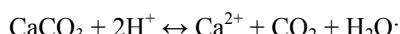
Для карбонатного коллектора очистка ствола скважины проводится для удаления осадков, таких как накипь и ржавчина, и растворения отложений в стволе скважины. Для этой цели впрыскиваются различные виды добавок, такие как взаимные растворители, поверхностно-активные вещества и ингибиторы коррозии. Затем следует предварительная промывка, которая проводится для создания среды, подходящей для удовлетворительного проведения основной кислотной стимуляции. Для этого жидкость предварительной промывки создает барьер между пластовой и основной кислотной жидкостями, чтобы не образовалась эмульсия или осадок [3, 8]. После предварительной промывки проводится основная кислотная обработка для создания проницаемости в пласте по мере необходимости. Поскольку карбонаты очень неоднородны, а кислота имеет тенденцию перемещаться к зонам с высокой проницаемостью, в некоторых случаях в процессе интенсификации требуется отвод, чтобы кислота могла размещаться и в зонах с низкой проницаемостью. После основной кислотной обработки выполняется промывка для удаления остатков реакции стимуляции, которые могут создать помехи. Наконец, происходит вытеснение, чтобы удостовериться, что жидкость с избыточной промывкой достигла слоев резервуара и обратный поток жидкости происходит эффективно [9].

Во время стимуляции взаимодействие кислоты и породы происходит в три этапа:

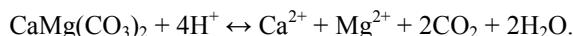
- 1) перенос ионов водорода H из жидкости на поверхность породы, где она распространяется;
- 2) реакция ионов водорода H с кальцитом или доломитом;
- 3) образование продуктов реакции, таких как ионы кальция Ca^{2+} и ионы магния Mg^{2+} , которые перемещаются с поверхности породы к жидкостям.

Реакцию с кальцитом и доломитом можно описать следующими химическими реакциями [3, 9]:

– для известняка:



– для доломита:



Самый медленный шаг в реакции контролирует скорость реакции, именно здесь температура является важным параметром, который следует учитывать. При низких температурах реакция ионов водорода H с породой становится медленнее, чем две другие стадии, связанные с переносом реагентов и продуктов на поверхность и с поверхности, в то время как при высоких температурах скорость диффузии

ионов водорода H отвечает за общую скорость реакции, т. к. реакционная способность кислоты увеличивается с повышением температуры [3, 4, 8–11].

Выводы

Существуют три основные проблемы, связанные с проведением операции кислотной обработки матрицы.

1. Высокореакционный контакт кислоты с поверхностью породы. Породы-коллекторы имеют высокую скорость реакции при высоких температурах. В результате появляется локальная деструкция поверхности породы. Кислота быстро расходуется на начальных этапах транспортировки с поверхности на породу и не способствует достижению необходимой глубины из-за быстрого темпа растворения, происходящего прямо на поверхности породы.

2. Утечка жидкости во время потока, т. к. кислота попадает в естественные трещины и зоны воровства. Утечки жидкости создаются из-за наличия

естественных или искусственно вызванных зон высокой проницаемости. Эти пути вызывают потерю кислоты на начальных этапах процесса стимуляции, что приводит к образованию малого количества проточных каналов, и в некоторых случаях желаемая глубина не достигается. Это связано с тем, что кислота имеет тенденцию двигаться в сторону зон высокой проницаемости, из-за чего зоны с низкой проницаемостью не снабжаются. В этом случае реализуются методы отвода. Методы механического отвода, такие как шаровые уплотнители и пакеры, являются дорогостоящими. Поэтому рекомендуется использовать химические нейтрализующие средства.

3. Образование осадков из-за закисления [3, 10, 11]. Для решения этой проблемы подкисляющая жидкость должна иметь линейный и плавный поток и быть достаточно вязкой, чтобы действовать как отводящий агент для предотвращения утечки жидкости. Он должен обладать замедляющим эффектом для снижения скорости реакции и предотвращать образование осадка.

Список источников

1. Da Motta E. P. et al. Accounting for silica precipitation in the design of sandstone acidizing // SPE Production & Facilities. 1993. Vol. 8, N. 02. P. 138–144.
2. Kumar H. T., Muhammed S., Nasr-El-Din H. A. Compositional modeling of carbonate acidizing processes with CO₂ evolution in aqueous environments // SPE Journal. 2020. Vol. 25, N. 04. P. 1916–1937.
3. Yousufi M. M., Mohyaldinn Elhaj M. E., Dzulkarnain I. B. A review on use of emulsified acids for matrix acidizing in carbonate reservoirs // ACS omega. 2024. Vol. 9, N. 10. P. 11027–11049.
4. Даньщикова И. И. и др. Структура пустотного пространства в силурийских карбонатных породах северо-востока Тимано-Печорской провинции // Нефтегаз. геология. Теория и практика. 2020. Т. 15, № 3. С. 3.
5. Брежнева И. Н., Ермакова О. Ю., Подковырова О. Н. Оценка экологической устойчивости почв санитарно-защитной зоны Оренбургского газоперерабатывающего завода с применением матрицы почв // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 2. С. 46–51.
6. Смирнова А. Н. Методология увеличения нефтеотдачи пласта с применением кислотной обработки // Материалы X Международ. науч.-практ. конф. «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (Междуреченск, 22 апреля 2021 г.). Междуреченск: Кузбас. гос. техн. ун-т, 2021. С. 168.1–168.5.
7. Муслимов Р. Х. Особенности разведки и разработки нефтяных месторождений в условиях рыночной экономики // Георесурсы. 2009. № 3 (31). С. 22.
8. Глущенко В. Н., Пташко О. А. Фильтрационные исследования новых кислотных составов для обработки карбонатных коллекторов // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Геология, нефтегаз. и гор. дело. 2014. № 11. С. 46–56.
9. Черемисина В. А. Оценка эффективности кислотных обработок на керне Куюбинского месторождения: выпуск. квалификац. работа бакалавра. Красноярск: Сибир. фед. ун-т, 2017. 57 с.
10. Насибулин И. М., Мисолина Н. А., Баймашев Б. А. Современные представления о влиянии геологических факторов, определяющих процесс взаимодействия кислотных растворов с карбонатной породой // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. № 3. С. 56–61.
11. Андреев К. В. Анализ применения кислотных составов в высокотемпературных карбонатных коллекторах // Недропользование. 2021. Т. 21, № 2. С. 76–83.

References

1. Da Motta E. P. et al. Accounting for silica precipitation in the design of sandstone acidizing. *SPE Production & Facilities*, 1993, vol. 8, no. 02, pp. 138–144.
2. Kumar H. T., Muhammed S., Nasr-El-Din H. A. Compositional modeling of carbonate acidizing processes with CO₂ evolution in aqueous environments. *SPE Journal*, 2020, vol. 25, no. 04, pp. 1916–1937.
3. Yousufi M. M., Mohyaldinn Elhaj M. E., Dzulkarnain I. B. A review on use of emulsified acids for matrix acidizing in carbonate reservoirs. *ACS omega*, 2024, vol. 9, no. 10, pp. 11027–11049.
4. Dan'shhikova I. I. i dr. Struktura pustotnogo protstranstva v silurijskih karbonatnyh porodah severovostoka Timano-Pechorskoy provincii [The structure of void space in Silurian carbonate rocks of the northeastern Timan-Pechora province]. *Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika*, 2020, vol. 15, no. 3, p. 3.
5. Brezhneva I. N., Ermakova O. Ju., Podkovyrova O. N. Ocenna jekologicheskoy ustoichivosti pochv sanitarno-zashhitnoj zony Orenburgskogo gazopererabatyvajushhego zavoda s primeniem matricy pochv [Assessment of the ecological stability of soils in the sanitary protection zone of

- the Orenburg Gas Processing Plant using a soil matrix]. *Zashchita okruzhayushhej sredy v neftegazovom komplekse*, 2015, no. 2, p. 46-51.
6. Smirnova A. N. Metodologija uvelichenija nefteotdachi plasta s primeneniem kislotnoj obrabotki [Methodology for increasing oil recovery using acid treatment]. *Materialy H Mezhdunarodnoj nauchnoprakticheskoy konferencii «Sovremennye tendencii i innovacii v naуke i proizvodstve» (Mezhdurechensk, 22 aprelya 2021 goda)*. Mezhdurechensk, Kuzbasskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet, 2021. Pp. 168.1-168.5.
7. Muslimov R. X. Osobennosti razvedki i razrabotki neftjanyh mestorozhdenij v uslovijah rynochnoj jekonomiki [Features of oil field exploration and development in a market economy]. *Georesursy*, 2009, no. 3 (31), p. 22.
8. Glushchenko V. N., Ptashko O. A. Fil'tracionnye issledovanija novyh kislotnyh sostavov dlja obrabotki karbonatnyh kollektorov [Filtration studies of new acid compositions for the treatment of carbonate reservoirs]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 10-15.
9. Cheremisina V. A. *Ocenka jeffektivnosti kislot-nyh obrabotok na kerne Kujumbinskogo mestorozhdenija: vypusknaja kvalifikacionnaja rabota bakalavra* [Assessment of the effectiveness of acid treatments on the core of the Kuyumbinsk deposit: bachelor's thesis]. Krasnojarsk, Sibirskij federal'nyj universitet, 2017. 57 p.
10. Nasibulin I. M., Misolina N. A., Bajmashev B. A. Sovremenne predstavlenija o vlijanii geologicheskikh faktorov, opredeljajushhih process vzaimodejstvija kislotnyh rastvorov s karbonatnoj porodoj [Modern concepts of the influence of geological factors determining the interaction of acid solutions with carbonate rock]. *Geologija, geofizika i razrabotka neftjanyh i gazovyh mestorozhdenij*, 2011, no. 3, pp. 56-61.
11. Andreev K. V. Analiz primenenija kislotnyh sostavov v vysokotemperaturnyh karbonatnyh kollektora [Analysis of the use of acid compositions in high-temperature carbonate reservoirs]. *Nedropol'zovanie*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 76-83.

Статья поступила в редакцию 21.03.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принятa к публикации 13.05.2025
The article was submitted 21.03.2025; approved after reviewing 22.04.2025; accepted for publication 13.05.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Альберт Хамед-Харисович Нугманов – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; albert909@yandex.ru

Albert Kh.-Kh. Nugmanov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; albert909@yandex.ru

Амир Амиржанович Джарканалиев – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; amir.vaer@gmail.com

Amir A. Jarkanaliev – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; amir.vaer@gmail.com

Эльгам Заурович Исааналиев – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; dortmund813@mail.ru

Elgam Z. Isanaliev – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; dortmund813@mail.ru

Екатерина Владимировна Соколова – ассистент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; k_sokolova93@mail.ru

Ekaterina V. Sokolova – Lecturer of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; k_sokolova93@mail.ru

