

Магомедрагим С.А.

Магистр

Научный руководитель: Богопольский В.О., доцент Азербайджанского государственного института нефти и промышленности

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности.

СОВРЕМЕННЫЕ ИННОВАЦИИ В КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКЕ КАК ХИМИЧЕСКОМ МЕТОДЕ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Аннотация

Третичные методы увеличения нефтеотдачи (Enhanced Oil Recovery, EOR) играют ключевую роль в вовлечении остаточных запасов нефти в разработку на поздних стадиях эксплуатации месторождений. Среди химических методов EOR особое место занимает кислотная обработка пластов, широко применяемая как в карбонатных, так и в терригенных коллекторах. В статье рассмотрены современные направления развития кислотных технологий: наноструктурированные эмульгированные кислоты (Pickering-эмульсии), замедленные и самоотклоняющиеся кислотные системы, гелеобразующие и вискоэластичные кислоты, экологически адаптированные составы, а также цифровизация проектирования кислотных обработок. Проанализированы результаты исследований, выполненных в европейских, азиатских и ближневосточных научных центрах в 2020–2025 гг. Показано, что инновационные кислотные системы позволяют повысить глубину проникновения реакционноспособного агента, снизить скорость преждевременной нейтрализации, улучшить охват неоднородных пластов и сократить экологические риски.

Ключевые слова: третичные методы нефтеотдачи, химические методы EOR, кислотная обработка, матричная кислотизация, наночастицы, эмульгированные кислоты, замедленные кислоты.

Mahammadrahim S.A.

Master's Student

Scientific Supervisor: Bogopolsky V.O., Associate Professor, Azerbaijan State Oil and Industry University

Azerbaijan State Oil and Industry University

MODERN INNOVATIONS IN ACID TREATMENT AS A CHEMICAL METHOD OF ENHANCED OIL RECOVERY

Abstract

Enhanced Oil Recovery (EOR) methods play a key role in involving residual oil reserves in production during the late stages of field development. Among chemical EOR methods, acid treatment of reservoirs occupies a special place and is widely applied in both carbonate and terrigenous formations. This article examines modern trends in the development of acidizing technologies, including nanostructured emulsified acids (Pickering emulsions), retarded and self-diverting acid systems, gel-forming and viscoelastic acids, environmentally adapted formulations, as well as the digitalization of acid treatment design. The study analyzes research results obtained by European, Asian, and Middle Eastern scientific centers during the period from 2020 to 2025. It is shown that innovative acid systems make it possible to increase the penetration depth of reactive agents, reduce the rate of premature neutralization, improve sweep efficiency in heterogeneous reservoirs, and minimize environmental risks.

Keywords: enhanced oil recovery methods, chemical EOR methods, acid treatment, matrix acidizing, nanoparticles, emulsified acids, retarded acids.

1. Введение

По мере истощения традиционных залежей нефти доля трудноизвлекаемых запасов неуклонно возрастает. Коэффициент нефтеотдачи (КИН) при первичных и вторичных методах разработки в среднем не превышает 30–40 %. Оставшаяся нефть удерживается капиллярными силами, адсорбцией на поверхности породы, гравитационными эффектами и фильтрационной неоднородностью коллектора.

Третичные методы увеличения нефтеотдачи (EOR) направлены на мобилизацию остаточной нефти за счёт изменения физико-химических свойств системы «пласт — флюид». Химические методы EOR включают:

- полимерное заводнение,
- ПАВ-полимерные композиции,
- щёлочные технологии,
- микробиологические методы,
- кислотную обработку пластов.

Кислотная обработка (acid stimulation, acidizing) традиционно рассматривается как метод интенсификации притока, однако в современных условиях она всё чаще интегрируется в концепцию химического EOR [6, 8], особенно при разработке карбонатных коллекторов с высокой степенью остаточной нефтенасыщенности.

2. Кислотная обработка как химический метод EOR.

Традиционная кислотная обработка подразделяется на:

- **Матричную кислотизацию** (давление ниже давления гидроразрыва);
- **Кислотный гидроразрыв пласта;**
- **Глубокую кислотную стимуляцию** в карбонатных системах.

В карбонатных коллекторах применяются растворы HCl (15–28 %), в терригенных — смеси HCl/HF («грязевые кислоты») [3, 4]. Основные механизмы:

- растворение карбонатного цемента,
- удаление кольматации,
- увеличение проницаемости призабойной зоны,
- формирование червоточин (wormholes).

Однако классические системы обладают рядом ограничений:

- высокая скорость реакции кислоты с породой;
- преждевременное расходование реагента;
- ограниченная глубина проникновения;

- риск образования вторичных осадков;
- экологические ограничения.

Эти проблемы стимулировали развитие инновационных кислотных технологий.

3. Современные инновации в кислотной обработке (2020–2025 гг.)

3.1. Наноструктурированные эмульгированные кислоты (Pickering-эмульсии)

Одним из наиболее перспективных направлений является использование наночастиц для стабилизации кислотных эмульсий. В работе Al-Dogail и соавт. (2025, ACS Omega) предложена система Pickering Emulsified Acid System (PEAS), где стабилизация водно-кислотной фазы осуществляется органоглинами вместо традиционных ПАВ.

Ключевые преимущества:

- снижение гидродинамического сопротивления;
- высокая термостабильность (до 50 °С и выше);
- улучшенное проникновение в глубину пласта;
- контролируемая реакционная способность.

Авторы показали, что системы с 15–20 % HCl обеспечивают устойчивое поведение при различных скоростях сдвига и сохраняют кислотность после динамических испытаний. Применение наночастиц позволяет регулировать баланс между стабильностью эмульсии и вязкостью, что критически важно для глубоких обработок [1].

Подобные исследования активно ведутся в Саудовской Аравии, Китае и Малайзии, где карбонатные коллекторы характеризуются высокой температурой и неоднородностью.

3.2. Замедленные (retarded) кислотные системы

Европейские и азиатские исследовательские группы уделяют значительное внимание замедленным кислотам, обеспечивающим контролируемую кинетику реакции.

Основные направления включают органические кислоты, эмульгированные кислоты, микроинкапсулированные системы и гелеобразующие кислоты [3, 4].

Исследования в Норвегии и Великобритании (North Sea carbonates) показали, что применение замедленных систем увеличивает глубину проникновения червоточин и способствует более равномерному распределению обработки в условиях трещиноватых карбонатов.

В китайских работах (2022–2024 гг.) активно изучаются системы с температурной активацией, где скорость реакции возрастает только при достижении пластовой температуры, что минимизирует потери в стволе скважины.

3.3. Вискоэластичные и самоотклоняющиеся кислоты

Для обработки неоднородных пластов применяются вискоэластичные кислотные системы, самодивергирующие кислоты и пенные кислотные композиции [1,7].

Вискоэластичные кислоты формируют временную структуру, увеличивающую вязкость при контакте с породой, что способствует отклонению потока в менее проницаемые зоны.

Исследования, проведенные в ОАЭ и Китае, показали, что такие системы позволяют повысить охват пласта на 20–35 % по сравнению с традиционными растворами HCl.

3.4. Экологически адаптированные кислотные технологии

В Европе (Германия, Франция) активно развиваются экологически безопасные реагенты:

- биоразлагаемые ингибиторы коррозии;
- кислоты на основе органических комплексов;
- системы с пониженным содержанием фтористоводородной кислоты.

Ужесточение экологических стандартов ЕС требует минимизации токсичных компонентов, особенно при разработке морских месторождений.

3.5. Цифровизация и моделирование кислотных процессов

Современные кислотные обработки всё чаще проектируются с использованием:

- CFD-моделирования,
- реакционно-фильтрационных моделей,
- машинного обучения для прогноза образования червоточин.

В университетах Великобритании и Норвегии ведутся исследования по цифровому моделированию морфологии червоточин с учётом кинетики растворения и неоднородности породы [1, 3].

Использование цифровых двойников позволяет:

- оптимизировать объём кислоты,
- минимизировать риски прорыва,
- повысить экономическую эффективность операций.

4. Перспективы развития

Наиболее перспективными направлениями являются:

1. Интеграция нанотехнологий с интеллектуальными реагентами.
2. Комбинирование кислотной обработки с CO₂-EOR.
3. Использование «умных» кислот, реагирующих на минералогию породы.
4. Полная цифровизация проектирования.

Ожидается, что в ближайшие 5–10 лет кислотная обработка окончательно перейдёт из категории вспомогательной стимуляции в полноценный элемент химического EOR [6, 8].

5. Заключение

Кислотная обработка остаётся одним из наиболее эффективных химических методов третичного увеличения нефтеотдачи. Современные инновации — наностабилизированные эмульсии, замедленные и вискоэластичные системы, экологически адаптированные реагенты и цифровое моделирование — позволяют существенно повысить глубину проникновения, улучшить охват пласта и снизить операционные риски.

Анализ европейских, азиатских и ближневосточных исследований 2020–2025 гг. показывает устойчивый тренд на интеграцию нанотехнологий и цифровых инструментов в кислотные технологии, что открывает новые возможности для вовлечения трудноизвлекаемых запасов нефти в разработку.

Список литературы

1. Al-Dogail A., Gajbhiye R., Sultan A., Solling T., Alsarkhi A., Patil S. **Pickering Emulsified Acid Systems (PEAS): A Promising Approach for Reduced Drag in**

- Matrix Acidizing.** *ACS Omega*, 2025, 10(33), 37710–37727. DOI: 10.1021/acsomega.5c04098.
2. Mahmoud A. A., Al-Dogail A. S., Gajbhiye R. N., Sultan A. S. **Development of Emulsified Acid System Using Organoclays.** SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference, Dubai, UAE, 2023. DOI: 10.2118/214149-MS.
 3. Kasza P., Dziadkiewicz M., Czupski M. **From Laboratory Research to Successful Practice: A Case Study of Carbonate Formation Emulsified Acid Treatments.** SPE International Symposium on Formation Damage Control, 2006. DOI: 10.2118/98261-MS.
 4. Nasr-El-Din H. A., Al-Dirweesh S., Samuel M. M. **Development and Field Application of a New, Highly Stable Emulsified Acid.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2008.
 5. Suleimanov B. A., Abbasov H. F. **Gasified acid solution in pre-transition state for well stimulation.** *Journal of Dispersion Science and Technology*, published online 10 Jan 2025. DOI: 10.1080/01932691.2024.2448758.
 6. Suleimanov B. A., Guseynova N. I., Rzayeva S. C., Tulesheva G. D. **Experience of Acidizing Injection Wells for Enhanced Oil Recovery at the Zhetybai Field (Kazakhstan).** SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition, Baku, 2017. DOI: 10.2118/189028-MS.
 7. Suleimanov B. A., Veliyev E. F., Aliyev A. A. **Colloidal dispersion nanogels for in-situ fluid diversion.** *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, Vol. 193, 107411. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107411.
 8. Vishnyakov V., Suleimanov B., Salmanov A., Zeynalov E. **Primer on Enhanced Oil Recovery.** Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-817632-0.