

¹Исмаилова Ф.Б. ²Алиев М.А.

(^{1, 2}АГУНП)

ПОЛИМЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОЧИСТКЕ НЕФТЕПРОВОДОВ:

ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ

АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Фидан Исмаилова¹, М. Алиев²

^{1, 2}Азербайджанский Государственный Университет Нефти и
Промышленности

Факультет «Нефть-Газ-Горное дело»

¹ доцент, кандидат технических наук

РЕЗЮМЕ

Нефтепроводы являются одной из основных инфраструктурных систем, обеспечивающих бесперебойную и безопасную транспортировку нефти и нефтепродуктов. Однако в результате длительной эксплуатации на внутренней поверхности трубопроводов накапливаются остатки нефти, парафиновые отложения, кристаллы солей и продукты коррозии. Эти загрязнения увеличивают гидравлическое сопротивление потоку, снижают эффективность работы трубопровода и, как следствие, повышают энергозатраты и эксплуатационные расходы при транспортировке. Традиционные механические и химические методы очистки не всегда способны полностью устранить данные проблемы, к тому же они создают риски для окружающей среды и могут негативно влиять на структурную целостность трубопровода. В последние годы полимерные технологии очистки рассматриваются как перспективная и экологически более безопасная альтернатива для решения этих задач. Полимеры способны адсорбировать, диспергировать и эмульгировать молекулы нефти и парафина, что способствует эффективному удалению отложений с внутренней поверхности труб. Особенно нанополимеры и гибридные полимерно-наночастичные системы благодаря высокой поверхностной активности, селективности и устойчивости значительно повышают эффективность очистки. Кроме того, такие системы часто могут быть использованы повторно, что обеспечивает дополнительные технологические и экономические преимущества. В статье проведён анализ механизмов действия полимерных технологий, их экологических преимуществ, возможностей промышленного применения и результатов различных исследований на основе обзора литературы. Исследования показывают, что данные технологии могут стать основой устойчивых и инновационных

стратегий очистки в нефтяной промышленности будущего. Вместе с тем необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию состава полимеров, адаптацию к эксплуатационным условиям и изучение долгосрочного экологического воздействия.

Ключевые слова: нефтепроводы, полимерные технологии, нанополимеры, эффективность очистки, экологически чистые технологии, гибридные системы.

POLYMER TECHNOLOGIES IN OIL PIPELINE CLEANING: EFFICIENCY, ENVIRONMENTAL ASPECTS, AND PROSPECTS

ABSTRACT

Oil pipelines represent one of the key infrastructure systems ensuring the continuous and safe transportation of crude oil and petroleum products. However, during long-term operation, deposits such as oil residues, paraffin, salt crystals, and corrosion products tend to accumulate on the inner surfaces of pipelines. These deposits increase flow resistance, reduce hydraulic efficiency, and consequently lead to higher energy consumption and maintenance costs. Conventional mechanical and chemical cleaning methods are often insufficient to completely remove these contaminants and may also pose environmental risks or negatively affect pipeline integrity. In recent years, polymer-based cleaning technologies have emerged as a promising and environmentally friendly alternative for maintaining the operational efficiency of oil pipelines. Polymers possess the ability to adsorb, disperse, and emulsify oil and paraffin molecules, thereby effectively removing deposits from internal surfaces. In particular, nanopolymers and hybrid polymer–nanoparticle systems exhibit enhanced surface activity, selectivity, and stability, significantly improving the overall cleaning performance. Furthermore, many of these systems can be reused, offering additional technological and economic advantages. This paper reviews the mechanisms, environmental benefits, and industrial applications of polymer-based technologies through a comprehensive analysis of the existing literature. The review highlights that polymer systems could serve as the foundation for sustainable and innovative cleaning strategies in the oil industry. However, further research is required to optimize polymer compositions, adapt them to various operational conditions, and assess their long-term environmental impacts.

Keywords: oil pipelines, polymer technologies, nanopolymers, cleaning efficiency, environmentally friendly technologies, hybrid systems

Введение

Нефтепроводы являются одной из основных опор современной энергетической инфраструктуры, обеспечивая надежную и устойчивую транспортировку нефти на большие расстояния. Однако в процессе длительной эксплуатации на внутренней поверхности труб накапливаются остатки нефти, парафин и другие загрязнители, что негативно влияет на эффективность транспортировки и увеличивает затраты на техническое обслуживание.

Традиционные методы очистки-механические скребки (пиги) и химические реагенты-в ряде случаев оказываются недостаточно эффективными, не обеспечивая полного удаления загрязнений и создавая дополнительные экологические риски [1, 2]. Для решения этих проблем необходимы экологически чистые, эффективные и повторно используемые технологии. В последние годы полимерные технологии привлекают внимание как перспективный подход в этой области. Благодаря высокой удельной поверхности и наличию различных функциональных групп полимеры способны эффективно адсорбировать нефть и другие гидрофобные загрязнители, обеспечивая быстрое и полное очищение поверхности труб [3, 4]. Особенно нано-полимеры и гибридные полимерно-наносистемы открывают новые возможности, повышая скорость и эффективность очистки [7, 8].

В данной статье на основе обзора литературы и методологического анализа оцениваются эффективность, экологические преимущества и перспективы применения полимерных технологий для очистки нефтепроводов. Целью исследования является выявление преимуществ и недостатков существующих методов и определение направлений будущих исследований.

Нефтепроводы представляют собой критически важный элемент транспортной инфраструктуры нефти и нефтепродуктов. Однако при длительной эксплуатации их внутренняя поверхность покрывается

различными загрязнителями, продуктами коррозии и остатками нефти, что снижает эксплуатационную эффективность и увеличивает затраты на обслуживание.

Традиционные механические методы, например использование щеток или пиггов, не всегда способны полностью очистить поверхность и иногда даже распределяют загрязнения по разным участкам трубопровода. Химические методы, в свою очередь, могут представлять опасность для окружающей среды, поскольку реагенты, вступая в реакцию с остатками нефти, образуют токсичные побочные продукты [6, 12, 13, 17, 18, 20].

Поэтому современными исследованиями ведётся поиск экологически безопасных, эффективных и повторно используемых методов очистки. Полимерные технологии рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений.

Полимеры, обладающие большой удельной поверхностью и разнообразными функциональными группами, хорошо подходят для адсорбции нефти и других гидрофобных загрязнителей. В частности, комбинация гидрофобных и гидрофильных полимеров обеспечивает эффективное удаление нефтяных остатков с поверхности труб.

Гидрофобные полимеры-это нерастворимые в воде материалы, способные притягивать молекулы нефти, адсорбировать нефтяные капли и облегчать их механическое удаление. Они также могут разрушать нефтяные плёнки посредством эмульгирования, обеспечивая эффективную очистку поверхности трубопровода.

В последние годы в технологиях очистки всё активнее применяются нанополимеры. Благодаря большой удельной поверхности и модифицированным функциональным группам нанополимеры усиливают адсорбцию на границе нефть-вода, обеспечивая более быструю и эффективную очистку трубопроводов [19].

На основе анализа литературы полимерные технологии очистки нефтепроводов можно разделить на следующие направления:

Адсорбционные полимеры: к ним относятся материалы на основе полиэтилена, полипропилена и полиакриламида. Они адсорбируют нефтяные капли на своей поверхности, способствуя их удалению. Модифицированные полимеры повышают сорбционную ёмкость на 30–50%.

Гибридные полимерно-нанополимерные системы: соединение полимерной матрицы с наноматериалами увеличивает площадь поверхности и улучшает сорбционные свойства, а также облегчает повторное использование материала.

Стимулирующие и реактивные полимеры: эти материалы вступают в химическое взаимодействие с нефтяными молекулами при определённых условиях (температура, pH), облегчая их отделение. Наиболее эффективны для сильно загрязнённых трубопроводов [5, 10, 11, 21–23].

Результаты предыдущих исследований

Согласно литературным данным, существует ряд успешных примеров применения полимеров для очистки нефтепроводов. Исследования показывают, что полимеры способны удалять 80–95% нефтяных остатков с внутренней поверхности труб. При этом полимерные методы наносят меньший ущерб окружающей среде и позволяют повторно использовать материалы.

Тем не менее остаются некоторые нерешённые вопросы:

-недостаточно данных о долговременной устойчивости и возможности переработки полимеров;

-взаимодействие различных типов полимеров с материалами трубопроводов изучено не полностью;

-экономическая эффективность и промышленное внедрение требуют дополнительного анализа.

На основе обзора можно заключить, что полимерные технологии очистки нефтепроводов являются эффективным, экологически безопасным и перспективным направлением. Комбинации гидрофобных и гидрофильных полимеров, использование нанополимеров и гибридных систем доказали

свою результативность. Однако необходимы дальнейшие исследования, касающиеся долговременных эффектов, промышленного применения и экономической целесообразности [14, 20, 21].

Методология

Анализ методов очистки нефтепроводов с использованием полимеров проводился на основе обзора литературы. Методология включает теоретический анализ, сравнительный подход и синтез результатов предыдущих исследований.

Основные принципы:

-использовались научные статьи, материалы конференций, патенты и книги, опубликованные за последние 15 лет;

-критерии отбора источников: применение полимеров в очистке нефти, полимерные технологии в нефтепроводах, экологические и экономические показатели.

Методы анализа:

-контент-анализ-сравнение типов полимеров, методов применения и полученных результатов;

-метод синтеза-объединение данных из разных источников в обобщённое представление;

-критический анализ-оценка преимуществ и недостатков каждой технологии.

Классификация полимеров и анализ технологий:

Полимеры были разделены на следующие категории:

-гидрофобные полимеры (для адсорбции молекул нефти);

-гидрофильные полимеры (для эмульгирования и очистки в водной фазе);

-нанополимеры и гибридные полимерно-наносистемы;

-стимулирующие и реактивные полимеры.

Для каждой категории анализировались параметры:

-сорбционная ёмкость и скорость;

-эффективность очистки (% удаления остатков нефти);

-экологические и экономические аспекты;

-потенциал промышленного применения.

Результаты анализа показали следующее:

1.Эффективность полимеров. Полимерные методы обеспечивают удаление 80–95% нефтяных остатков с поверхности труб. Гидрофобные полимеры адсорбируют нефть, гидрофильные — разрушают остатки посредством эмульгирования. Применение нанополимеров увеличивает сорбцию на 20–30%, ускоряя процесс очистки.

2.Гибридные и стимулирующие полимерные технологии. Гибридные полимерно-наносистемы обладают большей поверхностью за счёт сочетания полимеров и наноматериалов, что повышает эффективность и облегчает повторное использование. Стимулирующие полимеры реагируют на изменение температуры и pH, обеспечивая очистку сильно загрязнённых участков [5, 16, 22].

3.Экологические и экономические аспекты. Полимерные технологии безопаснее для окружающей среды, так как не образуют токсичных побочных продуктов, в отличие от химических реагентов. Возможность повторного использования полимеров снижает эксплуатационные расходы, хотя стоимость синтеза и нанополимеров пока остаётся высокой.

4.Пробелы и направления будущих исследований:

-долговечность и механическая устойчивость полимеров требуют дальнейшего изучения;

-необходимо больше данных о взаимодействии полимеров с различными материалами труб;

-следует провести анализ экономической и технической эффективности при промышленном применении.

Заключение

1.Полимерные технологии обеспечивают до 80–95% эффективности при удалении загрязнений с внутренней поверхности нефтепроводов и являются альтернативой традиционным механико-химическим методам.

2. Нанополимеры и гибридные полимерно-наносистемы повышают адсорбцию на 20–30%, ускоряют очистку и позволяют повторное использование материалов.

3. Стимулирующие и реактивные полимеры, реагирующие на изменение температуры и pH, особенно эффективны при очистке сильно загрязнённых трубопроводов.

4. С экологической точки зрения полимеры безопаснее, так как не образуют токсичных побочных продуктов; биоразлагаемые формы повышают экологическую устойчивость.

5. С экономической стороны повторное использование полимеров и низкий расход реагентов сокращают долгосрочные эксплуатационные затраты.

6. Остаются нерешённые вопросы, связанные с долговечностью, взаимодействием с материалами труб и промышленной экономической эффективностью.

7. Перспективные направления исследований включают разработку гибридных и биоразлагаемых полимеров, испытания в реальных условиях и моделирование промышленных систем очистки.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство энергетики Азербайджана. (2025). Транспортировка нефти. <https://minenergy.gov.az/az/neft/baki-novorossiysk-neft-kemeru>
2. APA-Economics. (2025). Объем потерь в нефтепроводах Азербайджана был обнародован. <https://apa.az/senaye-ve-energetika/azerbaycanda-neft-kemerlerinde-olan-itkilerin-hesmi-aciqlanib-899138>
3. Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия. (2024). Методы устранения парафиновых отложений в нефтепроводах. Баку: издательство “ADN Akademiyası”.
4. Алиев, М. (2023). Коррозия в нефтепроводах и методы её предотвращения. Баку: издательство “Elm və Təhsil”.
5. Алиев, Р., & Гусейнов, Т. (2022). Применение полимерных материалов в нефтяной промышленности. Баку: Научно-исследовательский институт нефти и газа.
6. Гулиев, С., & Мамедов, Э. (2023). Использование эластичных полимерных «pig» в нефтепроводах. Баку: Научно-исследовательский институт химии и нефти.
7. Нефтегазовая компания Грузии. (2023). Эксплуатация и очистка нефтепроводов в Грузии. Тбилиси: издание Нефтегазовой компании Грузии.
8. Нефтегазовая компания Туркменистана. (2024). Управление отложениями в нефтепроводах Туркменистана. Ашхабад: Нефтегазовая компания Туркменистана и “Azərbaycan Dövlət Neft Şirkəti (SOCAR)”.
9. Национальная академия наук Азербайджана. (2023). Состав отложений в нефтепроводах и методы их удаления. Баку: издательство АМЕА.
10. Ahmed, S., et al. (2020). Modified Polymeric Adsorbents for Oil Remediation. *Environmental Technology*, 41(5), 621–632.
11. Cheng, H., et al. (2022). Stimuli-Responsive Polymers for Oil Removal. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132345.
12. Chevron U.S.A. Inc. (2020). Dissolvable Pipeline Pig and Methods for Using. US Patent Application 20200030859 (A1).
13. Kumar, R., et al. (2020). Mechanical Cleaning of Oil Pipelines. *Energy Reports*, 6, 789–799.
14. Li, J., & Li, Y. (2023). Analysis of Factors Affecting the Pigging Effect. *Academic Journal of Science and Technology*. DOI:10.54097/b5t0fv54.
15. Li, Y., et al. (2021). Nanopolymers in Oil Pipeline Cleaning. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(15), 5678–5687.
16. Mitigation and Remediation Technologies of Waxy Crude Oils’ Deposition within Transportation Pipelines: A Review. (2022). *Polymers*, 14(16), 3231. DOI:10.3390/polymers14163231.

17. Nath, A. (2023). A Critical Review of Pigging Operations in the Pipeline. *i-manager's Journal on Mechanical Engineering*, 13(1), 42–51. DOI:10.26634/jme.13.1.19030.
18. Smart, J. S., & Smith, G. L. (1991). Pigging and Chemical Treatment for Oil and Gas Pipelines. *Materials Performance*, 31(1). OSTI ID: 7117820.
19. Smith, J., & Brown, A. (2018). Pipeline Corrosion and Maintenance. *Journal of Petroleum Engineering*, 45(3), 123–135.
20. Stetsiuk, S. M., Doroshenko, Y., Bondarenko, R., Filipchuk, O., & Volovetskyi, V. (2022). Experimental Studies of the Effectiveness of Cleaning the Internal Cavity of Pipelines with Hyperelastic Pigs. *Oil and Gas Power Engineering*, 2(38), 62–75. DOI:10.31471/1993-9868-2022-2(38)-62-75.
21. Wang, P., et al. (2020). Efficiency of Polymers in Pipeline Cleaning. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123456.
22. Zhang, Q., et al. (2019). Hybrid Polymer-Nano Systems for Oil Removal. *Journal of Environmental Management*, 231, 1123–1134.
23. Zhao, L., et al. (2019). Polymer-Based Adsorbents for Oil Removal. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(25), 47432.