 © Авторы статьи / Authors of the article

**РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ/DEVELOPMENT AND OPERATION OF OIL AND GAS FIELDS**

**DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.1 EDN: CBYCKN**

# ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОВЫШЕНИИ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ

Обзор

**Халиуллин Т.Ф.[1, *]**

[1] Общество с ограниченной ответственностью "ТатИТнефть", Альметьевск, Российская Федерация

[1] Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (timur.hal1ullin[at]yandex.ru)

Предложена: 16.07.2023; Принята: 26.02.2024; Опубликована: 18.03.2024

**Аннотация**

Статья посвящена проведению анализа возможностей использования цифровых технологий в повышении нефтеотдачи пластов. Отмечено, что повышение нефтеотдачи пластов (ПНП) представляет собой процесс искусственного воздействия на пласт с целью извлечения большего количества нефти после того, как вторичные методы стали неспособны поддерживать желаемые объемы добычи. Отдельное внимание уделено Интернету вещей и промышленному Интернету, искусственному интеллекту, большим данным и аналитике, роботизации и автоматизации, облачным вычислениям. В процессе исследования был сделан вывод, что использование достижений Четвертой промышленной революции позволяет удовлетворить мировые потребности в энергии, одновременно повышая производительность нефтяных месторождений.

**Ключевые слова:** нефтеотдача, цифровизация, Интернет вещей, облачные технологии.

# OPPORTUNITIES OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN ENHANCED OIL RECOVERY

Review article

**Khaliullin T.F.[1, *]**

[1] Tatneft Limited Liability Company, Almetyevsk, Russian Federation

[1] Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russian Federation

* Corresponding author (timur.hal1ullin[at]yandex.ru)

Suggested: 16.07.2023; Accepted: 26.02.2024; Published: 18.03.2024

**Abstract**

The article is dedicated to an analysis of the possibilities of using digital technologies in enhanced oil recovery. It is noted that enhanced oil recovery (EOR) is the process of artificially stimulating a reservoir to recover more oil after secondary methods have become incapable of maintaining desired production volumes. Special attention is given to the Internet of Things and industrial internet, artificial intelligence, big data and analytics, robotization and automation, and cloud computing. The study concludes that by utilizing the advances of the Fourth Industrial Revolution, it is possible to meet the world's energy needs while increasing the productivity of oil fields.

**Keywords:** oil recovery, digitalization, Internet of Things, cloud technologies.

## Введение

В последние несколько десятилетий наблюдается значительный рост мировых потребностей в энергии. В связи с этим нефть и продукты ее переработки играют значительную роль в мировом энергоснабжении [1]. Особое внимание в нефтегазовой отрасли уделяется инновационным разработкам.

После первичной и вторичной стадий добычи в пласте остается значительный остаточный объем углеводородов. Третичное восстановление или методы повышения нефтеотдачи (EOR) – это сложные процедуры, которые направлены на неподвижные части углеводородов, остающихся в пласте. В значительной степени отработанные месторождения страдают от более высоких эксплуатационных затрат, старения оборудования и сложной конфигурации недр, характеризующейся давлением и насыщенностью [2]. Эти проблемы делают концепции реконструкции, требующие значительных новых инвестиций, менее привлекательными и рискованными.

Многие руководители справедливо рассматривают цифровизацию как ключ к решению обозначенных проблем. За последнее десятилетие достижения в области анализа данных, искусственного интеллекта (ИИ) и промышленного Интернета вещей (IIoT) помогли нефтяным компаниям оптимизировать сложные процессы, отследить источники потерь и результативности, более эффективно реагировать на волатильность, потрясения и сбои. Не является в данном случае исключением и сфера повышении нефтеотдачи пластов [3].

Методами исследования послужили анализ, синтез, обобщение научных источников и статистических данных по проблеме исследования. Материалом исследования послужили открытые данные и научные источники по вопросам повышения нефтеотдачи пластов.

 © Авторы статьи / Authors of the article

**Основная часть**

Сегодня цифровая трансформация представляет собой главный тренд в нефтегазовом секторе. Среди передовых инноваций, реализуемых крупнейшими мировыми нефтегазовыми компаниями и связанными с извлечением углеводородов из глубоких и труднодоступных залежей, вложения в цифровые технологии занимают лидирующие места. Нефтяные компании видят большие возможности для применения широкого спектра быстро развивающихся технологий, включая корпоративные облачные вычисления, виртуальную и дополненную реальность, дроны и обмен данными на основе блокчейна для увеличения нефтеотдачи пластов. В связи с этим рассматриваемая тематика является актуальной, теоретически и практический значимой, что и обуславливает выбор темы данной статьи.

Перспективы и возможности использования искусственного интеллекта для выбора наиболее эффективных методов повышения нефтеотдачи в зависимости от характеристик пород-коллекторов и флюидов, а также геологических условий рассматриваются в трудах таких авторов как: О.В. Байкова, Е.О. Громыко [1], Е.А. Куклина, Д.Н. Семкова [2], И.Ф. Нурисламов [4], Ю.Д. Соколова [5], Р.И. Низамутдинов [6] и др. авторы.

Потенциал прогнозного анализа на основании технологии Big Data, который позволяет определить оптимальную программу будущего развития труднодоступного пласта, описывается F. Mehran [3], M. Iwase [7], Y. Liu [8], K. Sorbie, A. Skauge [9].

В тоже время, несмотря на активный интерес к рассматриваемой проблематике, достижения Четвертой промышленной революции, прорывные цифровые инновации, которые появляются на рынке, предопределяют необходимость регулярного обновления аналитической базы и корректировки сфер применения передовых технологий.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении потенциала использования цифровых технологий для повышения нефтеотдачи пластов.

Повышение нефтеотдачи пластов (ПНП) – это процесс искусственного воздействия на пласт с целью извлечения большего количества нефти после того, как вторичные методы стали неспособны поддерживать желаемые объемы добычи [6]. Кроме того, ПНП обычно применяется, когда оставшаяся в пласте нефть находится в труднодоступных (низкопроницаемых) участках с плохим водонефтяным контактом или неровными линиями разломов.

Цифровые технологии позволяют сделать третичные методы извлечения нефти более эффективными, безопасными и «умными» [5]. Например, алгоритмы ИИ обеспечивают конкурентное преимущество, а также позволяют нефтяным компаниям повысить производительность месторождений и скважин. Кроме того, постепенное внедрение передовой робототехники и методов управления данными ускоряет время обработки и снижает потребность в человеческом труде.

По итогам проведенного анализа можно выделить десять основных цифровых технологий, которые нашли свое применение в той или иной степени в процессе повышения нефтеотдачи пластов (рис. 1).

Рисунок 1 - Цифровые технологии в третичной добыче нефти и частота их использования

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.1.1

Анализ капитальных затрата на цифровизацию процесса нефтедобычи свидетельствует о том, что обнаруживаются значительные различия между тем, когда компании вкладывают средства в традиционные технологии или апробируют прорывные инновации. В среднем более прогрессивные технологические решения обеспечивают более высокую отдачу от производительности. Например, Интернет вещей и большие данные позволяют получить наибольшую прибыль: лидеры отрасли достигли 160% дополнительного показателя EBITDA на одного сотрудника, инвестирующего в эти технологии, тогда как для остальной части «не оцифрованного» сектора, этот показатель находился на отметке 120%. Далее следуют доходы от роботизации и облачных технологий, которые приносят 80% для цифровых лидеров и 40% для тех, кто этими технологиями пренебрегает. Ряд предприятий заявляет о наибольшей прибыли от инвестиций в 3D моделирование и визуализацию (90%), в то время как классические инженерные технологии обеспечивают 50% прибыли компаниям, ориентированным на них. Из всех проанализированных

 © Авторы статьи / Authors of the article

технологий когнитивные технологии принесли наибольшую отдачу нефтедобывающим предприятиям, обеспечив 1,90 доллара на сотрудника на каждый вложенный доллар [10].

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика рентабельности инвестиций в цифровые технологии для повышения нефтеотдачи пластов и традиционные приемы.

Таблица 1 - Рентабельность инвестиций в различные технологии нефтеотдачи пластов

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.1.2

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Рентабельность цифровые методы | Робототехника | Интернет вещей | Предиктивная аналитика | AR/VR | Блокчейн |
| | 1,9 | 1,7 | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| Рентабельность традиционные методы | Тепловые методы | Химические методы | Газовые методы | Гидродина-мические | Комбинированные |
| | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,9 | 1,4 |

*Примечание: EBITA -дол./на одного сотрудника [9]*

Рассмотрим более подробно возможности наиболее популярных технологий, представленных на рис. 1.

*Интернет вещей и промышленный Интернет вещей* – это системы взаимосвязанных вычислительных устройств и машин, которые соединены друг с другом цифровым способом для улучшения повседневных операций или оптимизации управления промышленными процессами. Датчики Интернета вещей в нефтегазовой отрасли используются для сбора данных в режиме реального времени из нефтяной скважины, которые можно комбинировать с цифровой аналитикой и инструментами самодиагностики для автоматического мониторинга и оптимизации производительности скважины [8].

В качестве примера можно привести новую технологию, позволяющую обнаруживать газ с помощью электрохимических датчиков. Также широкое распространение получили датчики, размещенные внутри скважин, противовыбросовые превенторы и дроссельные клапаны, которые дают возможность собирать данные в режиме реального времени. Используя эти сведения, облачные вычисления позволяют выявлять неисправное оборудование, помогая полевым инженерам прогнозировать и быстро реагировать на нештатные ситуации. Кроме того, решения Интернета вещей открывают широкие возможности для минимизации затрат на техническое обслуживание [7].

Реализованным на практике примером использования Интернета вещей, который успешно комбинирован с машинным обучением, является метод увеличения добычи нефти из скважин с тяжелой нефтью на основе заводнения паром. Ученые из исследовательского университета Корнелла предложили рабочий процесс парового заводнения месторождения для работы с категорией данных временных рядов, которые могут быть проанализированы с помощью алгоритмов машинного обучения под наблюдением и IIoT. На основании этого была предложена система оптимизации, которая рекомендует оптимальный план распределения пара, что в результате привело к повышению добычи нефти на 3% [9].

Кроме того, в 2016 году Shell развернула решение для подключения к Интернету вещей, которое объединило технологии автоматизации и контрольно-измерительных приборов для сбора данных с удаленных нефтяных месторождений и оптимизации операционной эффективности.

*Искусственный интеллект*. Это широкий термин для описания использования компьютеров, роботов и других машин с целью автономного выполнения задач, которые традиционно требовали человеческого разума. Одной из распространенных форм искусственного интеллекта в области повышения нефтеотдачи пластов является использование интеллектуальных алгоритмов для анализа операционных данных, извлечения информации, а затем автоматического внедрения улучшенных процессов [1].

Так, например, методы искусственного интеллекта могут быть использованы для оценки эффективности операции полимерного заводнения. Для этого строится модель и в качестве входных данных моделей выбираются основные параметры полимерного заводнения: концентрация полимера, концентрация соли, тип породы, начальная нефтенасыщенность, пористость, проницаемость, объем пор, температура, гравитация API, молекулярный вес полимера и соленость. Для реализации модели может использоваться многослойный перцептрон, радиальная базисная функция и нечеткие нейронные сети, такие как адаптивная нейро-нечеткая система умозаключений. Эта модель существенно помогает инженерам в выборе правильных методов повышения нефтеотдачи, а также определения какие параметры оказывают наибольшее влияние на эффективность полимерного заводнения.

*Большие данные и аналитика*. Повседневные операции в нефтяной отрасли генерируют большие объемы неструктурированных данных. Платформы больших данных помогают отраслевым аналитикам данных извлекать ценную информацию из сведений о производстве и производительности конкретных месторождений. Это также полезно для инженеров, которые стремятся оптимизировать добычу и обеспечить безопасность резервуаров. Помимо этого, исторические данные о предыдущих операциях лучше обучают и тестируют алгоритмы и модели, управляемые ИИ [6].

Большие данные и аналитика позволяют эффективно объединить сложнейшую математику с физикой пласта, машинным обучением, когнитивным анализом и массивными параллельными вычислениями. Результатом такой интеграции является поведенческая модель, которая описывает, что делает пласт, в дополнение к его геологической модели, которая описывает, что представляет собой пласт. Поведенческая модель способна за 24 часа отсеять более 15

 © Авторы статьи / Authors of the article

млн потенциальных планов разработки месторождений и найти оптимальный план, соответствующий целям нефтяной компании. Кроме того, за четыре месяца такая модель может создать прогноз добычи с точностью 95% (или выше). Данная модель была протестирована на десятках пластов по всему миру. Увеличение добычи более чем на 20% удалось достигнуть при минимальных капитальных вложениях; умеренные капитальные вложения обеспечили увеличение добычи на 35% и более [4].

Британский стартап Phoenix RDS использует большие данные и аналитику для оптимизации заводнения, добычи и бурения. Это позволяет операторам нефтегазовых активов повысить эффективность охвата пласта и снизить требования к объему закачки.

*Роботизация и автоматизация*. Зачастую операторы нефтегазовой отрасли работают в сложных и жестких условиях, представляющих значительный риск для безопасности людей. Для устранения этого риска нефтяная промышленность приспосабливается к решениям в области робототехники и автоматизации для повышения безопасности на рабочем месте, а также скорости выполнения операций.

Примером в данном случае является интегрированное цифровое решение по повышению нефтеотдачи пластов (ID-EOR), позволяющее в псевдореальном времени оптимизировать сети нагнетания и добычи для повышения эффективности активов и максимизации чистой текущей стоимости [5].

Показатели ID-EOR для каждого бизнес-процесса (например, отношение закачиваемой жидкости к нефти, индекс продуктивности и коэффициент извлечения), возможности автоматизации, логика и характеристики рабочего процесса, диаграммы потоков и математические модели определяются и отображаются отдельно для процессов закачки и добычи. С целью структурирования различных автоматизированных рабочих процессов в некоторых случаях используется подход, основанный принципах «плавательной дорожки». Этими «дорожками» являются (i) краткосрочная диагностика нагнетательных скважин и регулярное обновление сети, (ii) модель пласта, (iii) регулярное обновление сети добычи и краткосрочная диагностика добывающих скважин [3].

*Облачные технологии*. Облачные технологии способны хранить и обрабатывать данные на удаленных серверах, высвобождая дорогостоящую локальную память и вычислительные мощности.

В феврале 2019 года компания ExxonMobil заключила партнерство с Microsoft для внедрения облачных технологий в своих операциях в бассейне Permian Basin. Цель этого шага – обеспечить более эффективную работу и повысить прибыль за счет использования технологий Microsoft, включая Microsoft Azure, Dynamics 365, Machine Learning и IoT. Этот шаг гарантирует, что ExxonMobil получит представление о работе скважин и перспективах будущего бурения, что, как ожидается, позволит увеличить добычу на месторождениях в Permian примерно на 50 000 баррелей нефтяного эквивалента в день к 2025 году [10].

**Заключение**

Таким образом, подводя итоги, отметим, что цифровые технологии имеют высокий потенциал в области повышения нефтеотдачи скважин за счет объединения возможностей Интернета вещей, преимуществ зондирования, связи и аналитики, машинного обучения и искусственного интеллекта.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Байкова О.В. Эффекты цифровой трансформации в нефтегазовом комплексе / О.В. Байкова, Е.О. Громыко // Вестник ГУУ. — 2021. — №6. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effekty-tsifrovoy-transformatsii-v-neftegazovom-komplekse (дата обращения: 16.07.2023).

2. Куклина Е.А. Цифровые технологии как ключевой инструмент повышения эффективности нефтегазовой отрасли России в современных условиях функционирования / Е.А. Куклина, Д.Н. Семкова // Управленческое консультирование. — 2020. — №4 (136). — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-tehnologii-kak-klyuchevoy-instrument-povysheniya-effektivnosti-neftegazovoy-otrasli-rossii-v-sovremennyh-usloviyah (дата обращения: 16.07.2023).

3. Mehran F. Enhanced Oil Recovery Surveillance and Operation Optimization through Digital Oilfield / F. Mehran // International Petroleum Technology Conference. — 2022. — Vol. 5. — p. 3884-3895.

4. Нурисламов И.Ф. Влияние цифровой трансформации на эффективность нефтяных компаний / И.Ф. Нурисламов // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 5. — С. 65-67.

5. Соколова Ю.Д. Процесс цифровой трансформации нефтегазовой отрасли Российской Федерации: состояние, барьеры, перспективы / Ю.Д. Соколова // Н.Экс.Т. — 2021. — №3. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-tsifrovoy-transformatsii-neftegazovoy-otrasli-rossiyskoy-federatsii-sostoyanie-bariery-perspektivy (дата обращения: 16.07.2023).

6. Низамутдинов Р.И. Перспективы нефтяной отрасли и роль цифровизации в её развитии / Р.И. Низамутдинов // Экономика и управление: научно-практический журнал. — 2022. — № 5 (167). — С. 18-25.

7. Iwase M. Application of a Digital Oil Model to Solvent-Based Enhanced Oil Recovery of Heavy Crude Oil / M. Iwase // Energy and Fuels. — 2019. — Vol. 33. — No. 11. — p. 10868-10877.

 © Авторы статьи / Authors of the article

8. Liu Y. Pore-Scale Movability Evaluation for Tight Oil Enhanced Oil Recovery Methods Based on Miniature Core Test and Digital Core Construction / Y. Liu // Industrial and Engineering Chemistry Research. — 2021. — No. 6. — p. 2625-2633.

9. Sorbie K. Mobilization of By-Passed Oil by Viscous Crossflow in EOR Processes / K.Sorbie, A. Skauge // European Association of Geoscientists & Engineers. in IOR 2019–20th European Symposium on Improved Oil Recovery. — 2019. — vol. 2019. — no. 1. — p. 1-16

10. BRU21. Better Resource Utilization in the 21st century // NTNU Strategy for Oil and Gas. — URL: http://www.ipt.ntnu.no/BRU21_Report.pdf (accessed: 07/16/2023).

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Baikova O.V. Effekty cifrovoj transformacii v neftegazovom komplekse [Effects of Digital Transformation in the Oil and Gas Industry] / O.V. Bajkova, E.O. Gromyko // Vestnik GUU [Bulletin of the State University of Management]. — 2021. — №6. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effekty-tsifrovoy-transformatsii-v-neftegazovom-komplekse (accessed: 07/16/2023). [in Russian]

2. Kuklina E.A. Cifrovye tekhnologii kak klyuchevoj instrument povysheniya effektivnosti neftegazovoj otrasli Rossii v sovremennyh usloviyah funkcionirovaniya [Digital Technologies as a Key Tool for Improving the Efficiency of the Russian Oil and Gas Industry in Modern Operating Conditions] / E.A. Kuklina, D.N. Semkova // Upravlencheskoe konsul'tirovanie [Management Consulting]. — 2020. — No. 4 (136). — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-tehnologii-kak-klyuchevoy-instrument-povysheniya-effektivnosti-neftegazovoy-otrasli-rossii-v-sovremennyh-usloviyah (accessed: 07/16/2023). [in Russian]

3. Mehran F. Enhanced Oil Recovery Surveillance and Operation Optimization through Digital Oilfield / F. Mehran // International Petroleum Technology Conference. — 2022. — Vol. 5. — p. 3884-3895.

4. Nurislamov I.F. Vliyanie cifrovoj transformacii na effektivnost' neftyanyh kompanij [The Impact of Digital Transformation on the Efficiency of Oil Companies] / I.F. Nurislamov // Innovacii i investicii [Innovations and Investments]. — 2021. — No. 5. — P. 65-67. [in Russian]

5. Sokolova Yu.D. Process cifrovoj transformacii neftegazovoj otrasli Rossijskoj Federacii: sostoyanie, bar'ery, perspektivy [The Process of Digital Transformation of the Oil and Gas Industry of the Russian Federation: State, Barriers, Prospects] / YU.D. Sokolova // N.Eks.T. [N.Ex.T.] — 2021. — №3. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-tsifrovoy-transformatsii-neftegazovoy-otrasli-rossiyskoy-federatsii-sostoyanie-bariery-perspektivy (accessed: 07/16/2023). [in Russian]

6. Nizamutdinov R.I. Perspektivy neftyanoj otrasli i rol' cifrovizacii v eyo razvitii [Prospects for the Oil Industry and the Role of Digitalization in Its Development] / R.I. Nizamutdinov // Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskij zhurnal [Economics and Management: Scientific and Practical Journal]. — 2022. — No. 5 (167). — P. 18-25. [in Russian]

7. Iwase M. Application of a Digital Oil Model to Solvent-Based Enhanced Oil Recovery of Heavy Crude Oil / M. Iwase // Energy and Fuels. — 2019. — Vol. 33. — No. 11. — p. 10868-10877.

8. Liu Y. Pore-Scale Movability Evaluation for Tight Oil Enhanced Oil Recovery Methods Based on Miniature Core Test and Digital Core Construction / Y. Liu // Industrial and Engineering Chemistry Research. — 2021. — No. 6. — p. 2625-2633.

9. Sorbie K. Mobilization of By-Passed Oil by Viscous Crossflow in EOR Processes / K.Sorbie, A. Skauge // European Association of Geoscientists & Engineers. in IOR 2019–20th European Symposium on Improved Oil Recovery. — 2019. — vol. 2019. — no. 1. — p. 1-16

10. BRU21. Better Resource Utilization in the 21st century // NTNU Strategy for Oil and Gas. — URL: http://www.ipt.ntnu.no/BRU21_Report.pdf (accessed: 07/16/2023).