АННОТАЦИЯ
к диссертации Кенжебек Ержан Ғалымжанұлы на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D06103 – Компьютерные науки
на тему: «Физико-информированное машинное обучение для моделирования задачи вытеснения нефти»

Актуальность темы исследования. Точное моделирование многофазных потоков в пористой среде имеет важнейшее значение для инженерных приложений, таких как моделирование нефтяных месторождений, управление подземными водами и геологическое хранение углерода. Эти процессы относятся к важному классу дифференциальных уравнений, описываемых законами сохранения массы, импульса и энергии. В частности, такие уравнения сохранения необходимы для моделирования процессов фильтрации и переноса, как, например, вытеснение нефти водой или газом в подземных пористых пластах.

Классическим примером такого потока является вытеснение нефти водой, описываемое моделью Бакли-Леверетта (БЛ). Однако уравнение для насыщенности водой в модели БЛ имеет нелинейный гиперболический характер, что создает значительные численные трудности. Эти задачи нелинейного переноса сложны для традиционных численных методов, главным образом из-за наличия резких фронтов насыщенности и смешанных волн (ударных и распространяющихся волн).

Численные методы моделирования широко применяются при изучении нефтяных месторождений. Однако в условиях нехватки точных геологических данных актуальной становится задача получения точных прогнозов при ограниченном объеме информации, используя физические законы. Традиционные численные методы (конечные разности, конечные объемы и конечные элементы) страдают от численной диффузии, требуют мелкой дискретизации для достижения высокой точности и связаны с высокими вычислительными затратами. Эти ограничения стимулировали исследование более эффективных и точных альтернатив, таких как основанное на физике машинное обучение, в частности, физически информированные нейронные сети (PINN).

Методы машинного обучения, основанные на физике, направлены на решение данной проблемы путем интеграции управляющих физикой дифференциальных уравнений в структуру нейронной сети. Это достигается путем обогащения функции потерь соответствующими дифференциальными уравнениями. В настоящее время ведется активная работа по изучению потенциала машинного обучения в моделировании потоков в масштабных подземных образованиях.

В последние годы сети Колмогорова-Арнольда (KAN) показали более высокую параметрическую эффективность и интерпретируемость по сравнению с традиционными многослойными перцептронами. Физически информированные модели KAN (PIKAN) демонстрируют большой потенциал

в точной передаче физических законов и уменьшении требований к объему данных и количеству параметров.

Однако большинство современных исследований ограничиваются прогнозированием насыщенности водой в рамках одномерной модели Бакли-Леверетта, описываемой только фракционной функцией потока. В рамках PINN остается важный пробел в эффективном и точном моделировании согласованных полей насыщенности и давления с единой системной точки зрения. В данной диссертации предлагается система, способная одновременно предсказывать решения для насыщенности и давления с использованием единой архитектуры PIKAN, что придает новое развитие моделированию двухфазных потоков.

Цель диссертационной работы – решить задачу вытеснения нефти на основе модели Бакли-Леверетта с применением методов физико-информированных нейронных сетей (PINN и PIKAN), а также провести сравнение их эффективности.

Задачи исследования:

- Провести обзор применения методов PINN и PIKAN в задачах моделирования нефтедобычи
- Применить метод PINN для задачи вытеснения нефти на основе модели Бакли-Леверетта
- Применить метод PIKAN для задачи вытеснения нефти на основе модели Бакли-Леверетта
- Сравнить и проанализировать результаты полученных методов.

Методы исследования: обзор литературы, математическое моделирование, численные методы, реализация и обучение физико-информированных нейронных сетей (PINN и PIKAN), проведение численных экспериментов, а также оценка точности и валидация результатов с использованием статистических метрик и сравнение с эталонными решениями.

Объект исследования

Двухфазные (вода-нефть) потоки в пористой среде и описывающая их система уравнений Бакли-Леверетта.

Предмет исследования

Методы одновременного моделирования полей насыщенности воды и давления в двухфазных потоках с использованием нейронных сетей PINN и PIKAN.

Научная новизна полученных результатов:

- Применен метод на основе PINN для совместного моделирования давления и насыщенности в процессе двухфазной фильтрации по модели Бакли-Леверетта, при этом совмещение искусственной диффузии и взвешивания функций потерь позволило повысить точность моделирования.
- Адаптирована архитектура PIKAN для совместного моделирования давления и насыщенности в процессе двухфазной фильтрации по модели Бакли-Леверетта, показав, что она эффективна даже при значительно меньшем числе параметров.

Положения, выносимые на защиту:

- Применение метода PINN к моделированию двухфазной фильтрации по модели Бакли-Леверетта с совмещением искусственной диффузии и стратегии взвешивания функции потерь позволило снизить среднюю относительную L2 ошибку насыщенности на 27,86%, а давления – на 44,4% по сравнению с подходом, использующим только диффузию.

- Архитектура PIKAN позволяет моделировать двухфазную фильтрацию по модели Бакли-Леверетта с уменьшением числа параметров до 15 раз (с 25 752 до 1 722) по сравнению с методом PINN.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость: работа способствует развитию теоретических основ физически информированных методов машинного обучения и расширяет математические возможности сетей Колмогорова-Арнольда для моделирования многофазных потоков.

Практическая значимость: разработанные методы позволяют снизить вычислительные затраты при моделировании нефтяных месторождений и повысить точность и эффективность программ симуляции резервуаров.

Достоверность научных результатов:

Достоверность обеспечивается сравнением с аналитическими решениями, валидацией с использованием традиционных численных методов, контролем соответствия физическим законам и применением методов статистического анализа.

Связь темы с планами научно-исследовательских программ

Диссертационная работа выполнена в рамках следующих научных исследований:

- «Использование методов машинного обучения для решения задачи прогнозирования добычи нефти» – государственная регистрация № 0124РК00223, проект «Жас Ғалым», КазНУ им. аль-Фараби, 2024–2026 гг.;

- «Параллельные физико-информированные нейронные сети для решения задач вытеснения нефти» – государственная регистрация № 0124РК00389, грантовое финансирование КазНУ им. аль-Фараби, 2024–2026 гг.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трех основных глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 100 страниц, включая 25 таблиц, 39 рисунков и 32 формулы. Список литературы содержит 101 наименование.

В первой главе проводится обзор литературы, посвященной физически информированным нейронным сетям и сетям Колмогорова-Арнольда. Во второй главе представлено сравнительное исследование методов PINN и PIKAN для прогнозирования насыщенности воды по модели Бакли-Леверетта. В третьей главе рассматривается разработка и сравнение единой архитектуры PINN и PIKAN для одновременного моделирования насыщенности водой и давления.

Публикации по результатам исследования

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 3 – в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК, 3 – в рецензируемых журналах, входящих в базы цитирования «Web of Science» и/или «Scopus», и 4 – в сборниках международных конференций.

- Daribayev B., Akhmed-Zaki D., Imankulov T., Nurakhov Y., Kenzhebek Y. Using machine learning methods for oil recovery prediction // Proceedings of the 17th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR XVII). – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–13. – DOI: 10.3997/2214-4609.202035233

- Imankulov T., Kenzhebek Y., Makhmut E., Akhmed-Zaki D. Using machine learning algorithms to solve polymer flooding problem // Proceedings of ECMOR 2022. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–9. – DOI: 10.3997/2214-4609.202244056

- Bekele S.D., Kenzhebek Y., Imankulov T. On the effectiveness of Kolmogorov-Arnold networks for enhanced oil recovery prediction in polymer flooding // Proc. of 2024 7th International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence (ACAI), Guangzhou, China. – 2024. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ACAI63924.2024.10899678

- Kenzhebek Y., Bekele S.D., Imankulov T. Prediction of two-phase flow in porous media using physics-informed neural networks // Proc. Eurasian International Scientific Conference “Artificial Intelligence and Inverse Problems in Science, Technology and Industry”. – Astana, Kazakhstan, April 14–16, 2025. – P. 215–216

- Кенжебек Е.Ғ., Иманкулов Т.С., Ахмед-Заки Д.Ж. Предсказание добычи нефти методом полиномиальной регрессии // Вестник КазНИТУ. – 2020. – № 5(141). – С. 358–364

- Кенжебек Е., Иманкулов Т., Ахмед-Заки Д. Прогнозирование добычи нефти с помощью физико-информированной нейронной сети // Вестник КазНПУ «Физико-математические науки». – 2021. – № 4(76). – С. 45–50. – DOI: 10.51889/2021-4.1728-7901.06

- Бекеле С.Д., Айбагаров С., Кенжебек Е., Иманкулов Т.С., Маткерим Б. Прогнозирование коэффициента нефтеотдачи с использованием полносвязных и каскадных нейронных сетей // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – 2024. – № 4(94). – С. 42–53. – DOI: 10.47533/2024.1606-146X.003

- Kenzhebek Y., Imankulov T., Akhmed-Zaki D., Daribayev B. Implementation of regression algorithms for oil recovery prediction // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 2, No. 2(116). – P. 69–75. – DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253886 (Scopus процентиль – 54)

- Imankulov T., Kenzhebek Y., Bekele S.D., Makhmut E. Enhancing oil recovery predictions by leveraging polymer flooding simulations and machine learning models on a large-scale synthetic dataset // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 14:3397. – DOI: 10.3390/en17143397 (Scopus процентиль – 90, Web of Science – Q3)

- Kenzhebek Y., Imankulov T., Bekele S.D., Panfilova I., Akhmed-Zaki D. Coupled pressure and saturation prediction for two-phase flow in porous media using physics-informed neural networks (PINNs) // Computer Methods in Applied

Mechanics and Engineering. – 2025. – Vol. 446, Part A. – DOI: 10.1016/j.cma.2025.118229. (Scopus процентиль – 98, Web of Science – Q1)

Кроме того, на основе результатов диссертационного исследования был зарегистрирован следующий объект авторского права: объект авторского права под названием «Физико-информированные нейронные сети (PINN) для прогнозирования добычи нефти» зарегистрирован в Государственном реестре прав на объекты, охраняемые авторским правом Республики Казахстан. Свидетельство №49665 выдано 16 сентября 2024 года.