Кенжебек Ержан Ғалымжанұлының 8D06103 – Компьютерлік ғылымдар білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін «Мұнай ығыстыру есебін модельдеу үшін физикаға негізделген машиналық оқыту» тақырыбынағы диссертациясына

АҢДАТПА

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Кеуекті ортадағы көпфазалы ағынды дәл модельдеу – мұнай кен орындарын модельдеу, жерасты суларын басқару және геологиялық көміртекті сақтау сияқты инженерлік қолданбалар үшін аса маңызды. Бұл үдерістер массаның, импульстің және энергияның сақталу заңдарымен сипатталатын дифференциалдық теңдеулердің маңызды класына жатады. Атап айтқанда, бұл сақталу теңдеулері жерасты кеуекті қабаттардағы су-мұнай немесе газ-мұнай ығысуы сияқты ағын мен тасымалдау үдерістерін модельдеу үшін өте қажет.

Мұндай ағынның классикалық мысалы – Бакли-Леверетт (БЛ) моделімен сипатталатын су-мұнай ығысуы. Алайда БЛ моделінде алынған су қанықтылығы үшін қарастырылатын теңдеу сызықтық емес гиперболалық сипатқа ие болып, елеулі сандық қиындықтар туындатады. Бұл сызықтық емес тасымалдау мәселелері дәстүрлі сандық әдістерге қарағанда аса күрделі болып табылады, бұл негізінен шешімдегі күрт қанықтылық фронттары мен аралас толқындардың (соққы және таралу толқындарының) болуына байланысты.

Мұнай кен орындарын зерттеуде сандық модельдеу әдістері кеңінен қолданылады. Алайда нақты геологиялық мәліметтер жеткіліксіз болғандықтан, физикалық заңдарды пайдалана отырып, аз деректермен дәл болжам жасау мәселесі өзекті болып табылады. Дәстүрлі сандық әдістер (ақырлы айырмалар, ақырлы көлемдер және ақырлі элементтер) сандық диффузияға ұшырайды, жоғары дәлдік үшін ұсақ дискретизацияны талап етеді және есептеу шығындары жоғары болады. Бұл шектеулер физикаға негізделген машиналық оқытуды, атап айтқанда физикамен ақпараттандырылған нейрондық желілер (PINN), анағұрлым тиімді әрі дәл балама ретінде зерттеуге түрткі болуда.

Физикаға негізделген машиналық оқыту әдістері физиканы басқаратын дифференциалдық теңдеулерді нейрондық желіге интеграциялау арқылы дәл осы мәселені шешуге бағытталған. Бұл түрдегі енгізу әдетте қарастырылатын теңдеумен шығын функциясын байыту арқылы қол жеткізіледі. Қазіргі уақытта ауқымды жерасты түзілімдеріндегі ағын үдерістерін модельдеуде машиналық оқытудың әлеуетін анықтауға бағытталған елеулі күш-жігер жұмсалуда.

Соңғы жылдары Колмогоров-Арнольд желілері (KAN) дәстүрлі көпқабатты перцептрондармен салыстырғанда параметрлік үнемділікті және жоғары интерпретациялау қабілетін көрсетті. Физикаға негізделген KAN (PIKAN) модельдері физикалық заңдарды дәл бейнелеп, параметрлерді анықтау мен деректерге деген талапты азайтуда үлкен әлеует көрсетуде.

Алайда қазіргі зерттеулердің көпшілігі тек фракциялық ағын функциясы арқылы сипатталған бір өлшемді Бакли-Леверетт моделіндегі су қанықтылығын ғана болжауға шектеледі. PINN шеңберінде қанықтылық пен қысым өрістерінің табиғи үйлесімін тиімді және дәл модельдеуде біртұтас жүйе тұрғысынан маңызды олқылықтар бар. Бұл диссертацияда біртұтас PIKAN архитектурасын пайдалана отырып, су қанықтылығы мен қысым шешімдерін бір мезгілде болжай алатын жүйе ұсынылады, бұл екі фазалы ағын модельдеуде жаңа серпін береді.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты – физикаға негізделген нейрондық желі тәсілдерін (PINN және PIKAN) қолдану арқылы Бакли-Леверетт моделі негізіндегі мұнай ығыстыру есебін шешу және олардың тиімділігін салыстыру

Зерттеу міндеттері:

- Мұнай өндіру процестерін модельдеу есептерінде PINN және PIKAN қолдануына шолу
- Бакли-Леверетт моделі негізінде мұнайды ығыстыру есебін шешуде PINN тәсілін қолдану
- Бакли-Леверетт моделі негізінде мұнайды ығыстыру есебін шешуде PIKAN тәсілін қолдану
- Әдістердің нәтижелерін салыстыру және талдау

Зерттеу әдістері: әдебиеттерге шолу, математикалық модельдеу, сандық әдістер, физикамен ақпараттандырылған нейрондық желілерді (PINN және PIKAN) әзірлеу және оқыту, сандық эксперименттер жүргізу, сондай-ақ нәтижелердің дәлдігін бағалау және оларды эталондық шешімдермен салыстыра отырып валидациялау.

Зерттеу объектісі

Кеуекті ортадағы екі фазалы (су-мұнай) ағын үдерістері және оларды сипаттайтын Бакли-Леверетт теңдеулер жүйесі.

Зерттеу пәні

PINN және PIKAN нейрондық желілерін қолдана отырып, екі фазалы ағындағы су қанықтылығы мен қысым өрістерін бір уақытта модельдеу әдістері.

Алынған нәтижелердің ғылыми жаңалығы:

- Бакли-Леверетт моделін қолданатын екі фазалы фильтрация процесінде қысым мен қанықтылықты бірлесіп модельдеу үшін PINN-ге негізделген әдіс пайдаланылды; мұнда жасанды диффузияны және шығын функцияларының салмақталуын біріктіріп қолдану модельдеу нәтижелерін дәлірек қамтамасыз етті.
- Бакли-Леверетт моделін қолданатын екі фазалы фильтрация процесінде қысым мен қанықтылықты бірлесіп модельдеу үшін PIKAN архитектурасы бейімделді; бұл архитектура параметрлер саны әлдеқайда аз болған жағдайда да қолдануға болатынын көрсетті.

Қорғауға шығарылатын тұжырымдар:

- Бакли-Леверетт моделін қолданатын екі фазалы фильтрация процесін модельдеуде PINN әдісін қолдану, тек диффузия қолданылған тәсілмен

салыстырғанда, жасанды диффузия мен шығын функцияларын салмақтау стратегиясын біріктіру арқылы қанықтылық үшін орташа салыстырмалы L2 қателігін 27,86%-ға және қысым үшін 44,4%-ға дейін төмендетуге мүмкіндік берді.

- PIKAN архитектурасын қолдану Бакли-Леверетт моделіне негізделген екі фазалы фильтрация процесін PINN әдісімен салыстырғанда параметрлер санын 15 есеге дейін (25 752-ден 1 722-ге) азайта отырып модельдеуге мүмкіндік береді.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы

Теориялық маңыздылығы: зерттеу физикамен ақпараттандырылған машиналық оқыту әдістерінің теориялық негізін дамытып, Колмогоров-Арнольд желілерінің көпфазалы ағын модельдеуіндегі математикалық мүмкіндіктерін кеңейтеді.

Практикалық маңыздылығы: Әзірленген әдістер мұнай кен орындарын модельдеуде есептеу шығындарын азайтып, резервуарлық симуляция бағдарламаларының дәлдігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Ғылыми нәтижелердің сенімділігі:

Зерттеу нәтижелерінің сенімділігі аналитикалық шешімдермен салыстыру, дәстүрлі сандық әдістермен валидация жүргізу, физикалық заңдарға сәйкестікті бақылау және статистикалық талдау әдістерін қолдану арқылы қамтамасыз етіледі.

Тақырыптың ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы

Диссертациялық жұмыс келесідей ғылыми зерттеу жұмыстарының аясында орындалды:

- «Мұнай өндіруді болжау мәселесін шешу үшін машиналық оқыту әдістерін қолдану» - мемлекеттік тіркеу № 0124РК00223, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «Жас Ғалым» жобасы бойынша, 2024-2026 жылдарға арналған;ss

- «Мұнайды ығыстыру мәселелерін шешуге арналған параллель физпкалық-ақпараттандырылған нейрондық желілер» - мемлекеттік тіркеу № 0124РК00389, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ гранттық қаржыландыру бойынша, 2024-2026 жылдарға арналған.

Диссертациялық жұмыстың көлемі мен құрылымы

Диссертация кіріспеден, үш негізгі тараудан, қорытындыдан және әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың жалпы көлемі 100 бет, оның ішінде 25 кесте, 39 сурет және 32 формула бар. Әдебиеттер тізімі 101 атауды қамтиды.

Бірінші тарау физикамен-ақпараттандырылған нейрондық желілер мен Колмогоров-Арнольд желілеріне қатысты әдебиеттерге шолу жасалады.

Екінші тарау Бакли-Леверетт моделіндегі су қанықтылығын болжауға арналған PINN және PIKAN әдістерінің салыстырмалы талдауы ұсынылады.

Үшінші тарау су қанықтылығы мен қысымды бір уақытта модельдейтін біртұтас PINN және PIKAN архитектураларының әзірленуі мен салыстырулары қарастырылады.

Зерттеу нәтижелері бойынша жарияланымдар

Диссертация тақырыбы бойынша 10 баспа жұмысы жарияланды, оның ішінде 3 жұмыс ҒЖБССҚК ҚР ұсынған басылымдарда, 3 жұмыс халықаралық дәйексөздер базасына кіретін рецензияланатын журналдарда «Web of Science» және/немесе «SCOPUS», 4 жұмыс халықаралық конференциялар жинақтарында жарияланды.

- 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)

Сонымен қатар, диссертациялық зерттеу нәтижелері негізінде келесі авторлық құқық объектісі тіркелді: «Физико-информированные нейронные сети (PINN) для прогнозирования добычи нефти» атты авторлық құқық объектісі Қазақстан Республикасының авторлық құқықпен қорғалатын объектілерге құқықтардың мемлекеттік тізіліміне мәліметтерді енгізу туралы 2024 жылғы 16 қыркүйекте берілген №49665 куәлік тіркелген.