ОТЗЫВ

официального рецензента на диссертационную работу
Кенжебек Ержан Ғалымжанұлы на тему «Физико-информированное машинное обучение для моделирования задачи вытеснения нефти», предоставленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «8D06103 – Компьютерные науки»

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом)
1.	Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам:	Диссертация выполнялась в рамках следующих проектов: 1. «Использование методов машинного обучения для решения задач прогнозирования нефтедобычи» (№0124PK00223) 2. «Физически информированные нейронные сети для решения задач вытеснения нефти» (№0124PK00389)
		1) диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы);	
		2) диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы);	
		3) диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление).	
2.	Важность для науки	Работа вносит/не вносит существенный вклад в науку, а ее важность хорошо раскрыта/не раскрыта.	Работа вносит существенный вклад в науку, так как развивает методы физически информированных нейронных сетей и машинного обучения для моделирования процессов в

			нефтедобыче, что открывает новые перспективы в области прикладной математики и инженерии. Важность исследования убедительно раскрыта через акцент на снижении затрат моделирования, повышении точности прогнозов и применимости разработанных методов в реальных производственных задачах.
3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: 1) высокий; 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет.	Работа отличается высоким уровнем самостоятельности, поскольку автор самостоятельно разработал и адаптировал новые методы моделирования на основе PINN и PIKAN архитектур, а также провёл их сравнительный анализ.
4.	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) обоснована; 2) частично обоснована; 3) не обоснована.	Актуальность диссертации является обоснованной, поскольку моделирование двухфазных потоков (нефть–вода) в пористых средах это ключевая задача нефтяной инженерии и гидрологии, решение которой требует разработки новых подходов на основе физико-информированных нейросетей для повышения точности и

			эффективности вычислительных методов.
		4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации:	Содержание диссертации отражает тему исследования, так как все главы посвящены разработке и сравнению физико-информированных нейронных сетей для решения задачи вытеснения нефти на основе модели Бакли–Леверетта и закона Дарси, что полностью соответствует заявленной теме работы.
		1) отражает;	
		2) частично отражает;	
		3) не отражает.	
		4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации:	Цель и задачи диссертации соответствуют её теме, поскольку они направлены на разработку и анализ методов PINN и PIKAN для моделирования процессов вытеснения нефти в пористых средах по модели Бакли–Леверетта и закону Дарси, что полностью согласуется с предметной областью исследования.
		1) соответствуют;	
		2) частично соответствуют;	
		3) не соответствуют.	
		4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны:	Все разделы и положения диссертации полностью логически взаимосвязаны, поскольку её структура выстроена последовательно: от обзора литературы до разработки, сравнения и анализа унифицированных
		1) полностью взаимосвязаны;	
		2) взаимосвязь частичная;	
		3) взаимосвязь отсутствует.	

			архитектур для моделирования двухфазных потоков, что обеспечивает целостность и внутреннюю согласованность исследования.
		4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями:	Предложенные автором новые решения аргументированы и оценены, так как проведён сравнительный анализ PINN и PIKAN: показано, что при трёхкратном сокращении числа параметров (1140 против 3462) PIKAN достигает сопоставимой точности с классическим PINN, а включение искусственной диффузии существенно повышает стабильность и качество аппроксимации, что свидетельствует о наличии критического анализа и обосновании преимуществ новых методов.
		1) критический анализ есть;	
		2) анализ частичный;	
		3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов;	
		4) анализ отсутствует.	
5.	Принцип научной новизны	5.1 Научные результаты и положения являются новыми?	Научные результаты и положения диссертации являются новыми, так как впервые разработана и апробирована унифицированная архитектура PINN и предложен метод PIKAN для моделирования процессов вытеснения нефти, что позволило достичь сопоставимой точности при
		1) полностью новые;	
		2) частично новые (новыми являются 25-75%);	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	

			существенно меньшем числе параметров по сравнению с классическими подходами.
		5.2 Выводы диссертации являются новыми?	Выводы диссертации являются новыми, поскольку в них впервые показана эффективность унифицированной архитектуры PINN и метода PIKAN для моделирования процессов вытеснения нефти, что позволило существенно снизить число параметров при сохранении высокой точности по сравнению с существующими подходами.
		1) полностью новые;	
		2) частично новые (новыми являются 25-75%);	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	
		5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными:	Технические и технологические решения диссертации являются новыми и обоснованными, поскольку автор разработал унифицированную архитектуру PINN и предложил метод PIKAN для моделирования процессов вытеснения нефти, что подтверждено регистрацией авторского права «Физико-информированные нейронные сети (PINN) для прогнозирования добычи нефти» в государственном реестре объектов авторских прав Республики Казахстан
		1) полностью новые;	
		2) частично новые (новыми являются 25-75%);	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	

			(свидетельство №49665 от 16 сентября 2024 года).
6.	Обоснованность основных выводов	Все основные выводы основаны/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (куолитатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам).	Все основные выводы диссертации основаны на весомых научных доказательствах, поскольку подтверждены результатами более 650 численных экспериментов, систематическим сравнением методов PINN и PIKAN и анализом их эффективности при решении задач вытеснения нефти по модели Бакли–Леверетта.
7.	Основные положения, выносимые на защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности:	Положение 1 Использование комбинации искусственной диффузии и оптимизированного взвешивания функции потерь в PINN позволяет существенно повысить точность моделирования процессов двухфазной фильтрации. 7.1 Доказано ли? – Да, доказано на основе серии численных экспериментов (более 650), где показано снижение средней относительной ошибки L2 по насыщенности на ~27,86% и по давлению на ~44,4%. 7.2 Является ли тривиальным? – Нет, не является тривиальным,
		7.1 Доказано ли положение?	
		1) доказано;	
		2) скорее доказано;	
		3) скорее не доказано;	
		4) не доказано;	
		5) в текущей формулировке проверить доказанность положения невозможно.	
		7.2 Является ли тривиальным?	
		1) да;	
		2) нет;	
		3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно.	
		7.3 Является ли новым?	
		1) да;	

		2) нет; 3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно. 7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; 3) широкий; 4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно. 7.5 Доказано ли в статье? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	так как ранее стандартные PINN не справлялись с аппроксимацией гиперболического фронта скачка без модификаций. 7.3 Является ли новым? – Да, является новым, поскольку впервые предложено и обосновано сочетание искусственной диффузии с оптимальным весовым балансом в функции потерь. 7.4 Уровень для применения – Средний, так как результаты могут быть использованы в научных исследованиях и инженерных расчетах, но требуют специальных знаний в области численных методов и нейросетей. 7.5 Доказано ли в статье? – Да, результаты представлены в публикациях автора и подтверждены расчетами с приведением количественных данных (ошибки, сравнения моделей). Положение 2 Метод PIKAN позволяет получать сопоставимую с PINN точность при существенно меньшем числе параметров

			(сокращение примерно в 15 раз). 7.1 Доказано ли? – Да, доказано сравнительным анализом: PIKAN показал сопоставимую точность при 1 722 параметрах против 25 752 у PINN. 7.2 Является ли тривиальным? – Нет, не является тривиальным, так как ранее компактные архитектуры не обеспечивали адекватной аппроксимации в задачах такого класса. 7.3 Является ли новым? – Да, является новым, поскольку впервые продемонстрировано применение PIKAN для задач вытеснения нефти по модели Бакли–Леверетта. 7.4 Уровень для применения – Средний, так как методика применима в инженерных расчетах и научных исследованиях, но требует профессиональной подготовки в области машинного обучения и моделирования. 7.5 Доказано ли в статье? – Да, доказано и опубликовано в статьях автора, результаты представлены в виде численных сравнений и таблиц ошибок.

8.	Принцип достоверности.	8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана:	Выбор методологии является обоснованным, так как в диссертации подробно описаны используемые подходы (математическое моделирование, численные методы, PINN и PIKAN), а также проведена их валидация на основе эталонных решений и серии численных экспериментов.
	Достоверность источников и предоставляемой информации	1) да;	
		2) нет.	
		8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий:	Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований, включая физико-информированные нейронные сети (PINN и PIKAN), численные эксперименты, методы оптимизации и анализа ошибок, а также с применением компьютерных технологий для обработки и интерпретации данных.
		1) да;	
		2) нет.	
		8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты доказаны на основе педагогического эксперимента):	Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены, поскольку их корректность установлена на основе численных экспериментов (более 650), анализа ошибок и сравнения с
		1) да;	

		2) нет.	эталонными решениями, что демонстрирует экспериментальную проверку всех основных положений диссертации.
		8.4 Важные утверждения подтверждены/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу.	Важные утверждения в работе подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу, что обеспечивает надежность и научную обоснованность представленных результатов.
		8.5 Использованные источники литературы достаточны/не достаточны для литературного обзора.	Использованные источники литературы охватывают ключевые современные исследования и являются достаточными для проведения полноценного и всестороннего литературного обзора.
9	Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение:	Диссертация обладает теоретическим значением, поскольку развивает методы математического моделирования и машинного обучения, расширяя научные представления о применении физически информированных нейронных сетей к задачам нефтедобычи.
		1) да;	
		2) нет.	
		9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике:	Диссертация имеет практическое значение, так как предложенные методы могут

		1) да; 2) нет.	быть внедрены в процессы прогнозирования и оптимизации нефтедобычи, что обеспечивает высокую вероятность их применения в реальных производственных условиях.
		9.3 Предложения для практики являются новыми: 1) полностью новые; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Предложения для практики являются полностью новыми, так как в них впервые предложены оригинальные методы применения физически информированных нейронных сетей к задачам моделирования и оптимизации процессов нефтедобычи.
10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма: 1) высокое; 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Качество академического письма в диссертации является высоким, поскольку текст отличается ясностью изложения, логической последовательностью аргументации и соответствием принятым научным стандартам.
11.	Замечания к диссертации	Хотя предложенные методы новаторские, в работе полезно было бы подробнее описать ограничения используемых моделей и возможные пути их преодоления. В разделе, посвящённом практическому применению, можно было бы привести больше примеров апробации результатов на реальных промышленных данных.	

12.	Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи докторанта по теме исследования)	Научный уровень статей докторанта по теме исследования является высоким, так как они опубликованы в рецензируемых изданиях и содержат оригинальные результаты, соответствующие современным направлениям развития науки.
13.	Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	присудить степень доктора философии (PhD) или доктора по профилю по специальности «8D06103 - Компьютерные науки».

Официальный рецензент: Мусабаев Рустам Рафикович

Заведующий лабораторией

«Анализа и моделирования информационных

процессов», ведущий научный сотрудник

РГП на ПХВ «Институт информационных и вычислительных

технологий» КН МНВО РК, к.т.н., ассоц. профессор

(подпись)

(ФИО)