

АННОТАЦИЯ

**диссертации Махмут Ерлан на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D06105 – Системная инженерия
на тему: «Разработка гибридных высокопроизводительных алгоритмов для
численного моделирования задач вытеснения нефти»**

Актуальность темы исследования. Точное математическое моделирование многофазного течения с переносом химического агента в пористой среде имеет важное значение для инженерных приложений, таких как моделирование нефтяных пластов, повышение нефтеотдачи (МУН) и устойчивое управление зрелыми месторождениями. Указанные процессы описываются ключевым классом дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы и импульса; их корректное численное воспроизведение необходимо для планирования сценариев закачки, размещения скважин и экономической оценки проектов нефтеотдачи.

Характерным примером таких течений является полимерное заводнение, при котором водный раствор полимера закачивается в нефтяной коллектор для улучшения отношения подвижностей фаз и задержки прорыва вытесняющего фронта. Уравнения двухфазного течения с переносом полимера образуют систему трёх сильно связанных нелинейных уравнений в частных производных — для нефтяной и водной фаз, а также для растворённого полимера, — дополненную законом Дарси, моделью относительной проницаемости Брукса–Кори, степенной модификацией вязкости полимерного раствора и изотермой адсорбции Лэнгмюра. Существенная нелинейность, резкие фронты вытеснения и нелинейная связь между растворённой и адсорбированной концентрациями полимера, обусловленная адсорбцией, создают значительные численные трудности для традиционных последовательных решателей.

Численные методы, такие как конечно-разностные и конечно-объёмные схемы IMPES, широко применяются при моделировании нефтяных пластов; однако при их применении к задачам полимерного заводнения с высоким разрешением на масштабе реальных месторождений требуется чрезвычайно мелкая пространственная и временная дискретизация, что приводит к запредельным вычислительным затратам. Указанные ограничения стимулировали поиск более эффективных вычислительных подходов и, в частности, разработку параллельных алгоритмов, способных в полной мере использовать всю иерархию современного гетерогенного вычислительного оборудования — кластеров с распределённой памятью, многоядерных процессоров с общей памятью и графических ускорителей GPU.

Методы высокопроизводительных вычислений решают данную задачу путём отображения исходных физических решателей на современное параллельное аппаратное обеспечение с сохранением численной корректности. В последние годы гибридные комбинации технологий MPI, OpenMP и CUDA продемонстрировали значительный потенциал ускорения для связанных задач многофазного течения. Тем не менее

большинство существующих исследований ограничивается однопарадигменным параллелизмом либо одним GPU; именно в контексте полимерного заводнения сохраняется существенный научный пробел в одновременной оптимизации всех трёх связанных физических ядер посредством тайлинга во встроенной памяти кристалла, а также в согласованной интеграции трёх независимых уровней параллелизма в рамках единого вычислительного конвейера. В настоящей диссертации предлагается единая иерархия из семи параллельных алгоритмов, позволяющая решать связанную систему уравнений полимерного заводнения на всём спектре современного гетерогенного аппаратного обеспечения и придающая новый импульс высокопроизводительному моделированию процессов повышения нефтеотдачи.

Цель диссертации

Целью диссертационной работы является разработка гибридных вычислительных алгоритмов для решения задач вытеснения нефти в нефтяных коллекторах с использованием высокопроизводительных вычислительных технологий, а также систематическое сравнение их эффективности по показателям ускорения, масштабируемости и численной точности относительно валидированной последовательной базовой реализации.

Задачи исследования:

- разработать последовательный численный алгоритм для одномерной задачи полимерного заводнения и после валидации установить его в качестве базовой реализации по производительности;
- реализовать и оценить параллельные алгоритмы на базе CPU — OpenMP с общей памятью, MPI с распределённой памятью и гибридный MPI+OpenMP — на многоядерных системах для шести размеров задачи;
- реализовать CUDA-алгоритм с использованием глобальной памяти GPU, развить его до нового CUDA-конвейера с использованием общей памяти GPU и расширить реализацию до многопроцессорной конфигурации MPI+CUDA;
- разработать трёхуровневый гибридный алгоритм MPI+OpenMP+CUDA и провести бенчмаркинг каждой реализации относительно последовательной базовой реализации с использованием инструментов Intel VTune, mpiP, NVIDIA Nsight Compute и NVIDIA Nsight Systems.

Методы исследования: методы исследования включают обзор литературы, математическое моделирование, конечно-разностную дискретизацию, схему IMPES с адаптивным выбором шага по условию Куранта, проектирование и реализацию параллельных алгоритмов с использованием моделей программирования OpenMP, MPI и CUDA, численные эксперименты на шести размерах сетки в диапазоне от $N = 65\,536$ до $N = 67\,108\,864$ ячеек, а также оценку точности и валидацию результатов посредством сопоставления с аналитическим решением Бакли–Левверетта, проверки сохранения массы с

машинной точностью и подтверждения данными профилирования с использованием инструментов Intel VTune, mpiP, NVIDIA Nsight Compute и NVIDIA Nsight Systems.

Объект исследования

Двухфазное (вода–нефть) течение с переносом растворённого полимера в одномерной пористой среде и описывающая его система трёх связанных уравнений в частных производных.

Предмет исследования

Методы высокопроизводительного параллельного решения связанных полей давления, насыщенности и концентрации полимера при полимерном заводнении с использованием технологий OpenMP, MPI, CUDA и их гибридных комбинаций на гетерогенных вычислительных платформах CPU–GPU.

Научная новизна результатов:

– Разработан полностью связанный численный алгоритм для давления, насыщенности и концентрации полимера на базе GPU с использованием стратегии тайлинга в общей памяти, в которой редукции shuffle уровня варпа исключают накладные расходы на межпотокую синхронизацию, а SM-резидентные тайлы амортизируют задержку обращения к глобальной памяти, что в совокупности повышает вычислительную эффективность моделирования многофазного течения в пористой среде.

– Разработан масштабируемый трёхуровневый гибридный параллельный алгоритм MPI–OpenMP–CUDA для крупномасштабного моделирования задач вытеснения нефти, обеспечивающий эффективные распределённые вычисления на нескольких GPU при работе со значительно большими расчётными сетками.

Положения, выносимые на защиту:

– Полностью связанная GPU-реализация решателей давления, насыщенности и концентрации полимера, основанная на тайлинге в общей памяти и параллелизме уровня варпа, обеспечивает ускорение до $20,2\times$ при приближении к пиковой вычислительной производительности FP64.

– Разработанный трёхуровневый гибридный параллельный алгоритм MPI+OpenMP+CUDA демонстрирует высокую масштабируемость и обеспечивает ускорение до $34,7\times$ по сравнению с оптимизированной последовательной реализацией при крупномасштабном моделировании задач вытеснения нефти.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость: исследование вносит вклад в развитие теоретических основ проектирования параллельных алгоритмов для связанных задач многофазного течения и расширяет методологические возможности полнопаппайнового тайлинга в

общей памяти и трёхуровневого гибридного параллелизма применительно к моделированию процессов переноса в пористых средах.

Практическая значимость: разработанные алгоритмы снижают вычислительные затраты при моделировании полимерного заводнения с высоким разрешением и повышают эффективность программного обеспечения для моделирования нефтяных пластов на общедоступной аппаратной платформе уровня рабочей станции, способствуя своевременному принятию инженерных решений в области повышения нефтеотдачи.

Достоверность научных результатов

Достоверность результатов обеспечивается сопоставлением с аналитическим решением Бакли–Леверетта, валидацией относительно последовательной базовой реализации с относительной погрешностью ниже 10^{-6} для полей давления, насыщенности и концентрации полимера, проверкой сохранения массы с машинной точностью, согласованностью с фундаментальными физическими законами, а также независимым подтверждением измерений производительности данными профилирования с использованием инструментов Intel VTune, mpiP, NVIDIA Nsight Compute и NVIDIA Nsight Systems.

Связь с научно-исследовательскими программами

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательского проекта «Высокопроизводительное компьютерное моделирование многофазного течения жидкости в пористой среде в условиях неопределённости» (номер государственной регистрации AP09260564, грантовое финансирование, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 2021–2023 гг.).

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми основных глав, заключения и списка использованных источников.

В первой главе изложены мотивация исследования, постановка задачи, цель и задачи исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, рамки и ограничения работы, а также экспериментальная платформа. Во второй главе проведён обзор литературы по четырём направлениям — полимерное заводнение как технология МУН, математическое моделирование многофазного течения в пористой среде, численные методы моделирования нефтяных пластов и подходы высокопроизводительных вычислений к моделированию пластов, — и выявлены три литературных пробела, заполняемые в диссертации. В третьей главе представлена математическая модель: три определяющих уравнения в частных производных, определяющие соотношения и одномерные формулировки граничных условий.

В четвёртой главе разработаны конечно-разностная дискретизация, схема IMPES с адаптивным выбором шага по условию Куранта и четыре подалгоритма последовательного симулятора. В пятой главе представлены три параллельных алгоритма на базе CPU

(OpenMP, MPI и гибриды MPI+OpenMP) с полной оценкой производительности на всех шести размерах сетки. В шестой главе разработаны CUDA-алгоритмы с использованием глобальной и общей памяти, включая первый научный результат диссертации. В седьмой главе представлены два многопроцессорных гибрида на GPU (MPI+CUDA и трёхуровневый гибриды MPI+OpenMP+CUDA), включая второй научный результат. В восьмой главе изложены единый бенчмаркинг семи алгоритмов и валидация результатов, подтверждённые данными инструментов профилирования.

Публикации по результатам исследования

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, 4 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus, и 2 доклада в материалах международных конференций.

Scopus:

1. Yerlan Makhmut, Timur Imankulov, Sergei Gorlatch, Bazargul Matkerim. A CUDA Performance Study of Global- and Shared-Memory Kernels for the Buckley–Leverett Polymer-Flooding Problem // Applied Sciences. – May 2026. – Q1 (79%).
2. 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. – Q1 (90%).
3. Daribayev B., Mukhanbet A., Makhmut E., Azatbekuly N., Imankulov T. Quantum–Classical Hybrid Architecture for Solving the Muskat–Leverett Model // IET Quantum Communication. – 2025. – Vol. 6, No. 1, e70022. – Q1 (79%).
4. Makhmut E., Imankulov T., Daribayev B. Parallel Implementation of Muskat–Leverett Equation Using CUDA // Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science. – 2023. – Vol. 119, No. 3. – Q4 (18%).

Международные конференции:

1. Makhmut E., Imankulov T., Daribayev B., Akhmed-Zaki D. Development of Hybrid Parallel Computing Models to Solve Polymer Flooding Problem // European Association of Geoscientists & Engineers, ECMOR 2022. – September 2022. – Vol. 2022. – P. 1–14. (Scopus).
2. Imankulov T., Kenzhebek Y., Makhmut E., Akhmed-Zaki D. Using Machine Learning Algorithms to Solve Polymer Flooding Problem // European Conference on the Mathematics of Geological Reservoirs (ECMOR 2022). – 2022. (Scopus).

Журналы, рекомендованные Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:

1. Махмут Е., Кенжебек Е.Г., Иманкулов Т.С. Решение задачи вытеснения нефти с использованием гибридного параллельного алгоритма MPI+OpenMP // Вестник КазНПУ им. Абая, серия «Физико-математические науки». – 2023. – №1(81). – С. 56–65.
2. Махмут Е., Иманкулов Т.С., Маткерим Б. Проектирование и разработка гибридной (MPI+CUDA) параллельной программы для решения задачи вытеснения нефти // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – 2024. – №1(91).
3. Махмут Е., Иманкулов Т. Сравнительный анализ алгоритмов редукции в CUDA для уравнения давления // Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies. – 2023. – Т. 1, №2.
4. Мустафин М.Б., Махмут Е. Сравнительный анализ эффективности использования графических процессоров в машинном обучении // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – 2024. – Декабрь.