

ҚҰРМАНСЕЙІТ МАҚСАТ БАҚЫТЖАНҰЛЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДОБЫЧЕ МИНЕРАЛОВ МЕТОДОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности
«6D060300 – Механика»

Общее описание работы. В диссертационной работе изучено влияние разности плотностей на гравитационное опущение раствора; проведено исследование массообменных процессов в пористых средах, возникающих при добыче урана методом подземного выщелачивания (ПВ) с использованием параллельных вычислений и методом линий тока

Актуальность работы. Метод подземного выщелачивания широко применяется при разработке урановых месторождений. Метод ПВ заключается в закачке кислотного или щелочного раствора, называемого выщелачивавшим, непосредственно в рудную залежь через сеть нагнетательных скважин и откачки продуктивного раствора, содержащего растворенный уран, через добывающие скважины. Этот способ добычи используется для разработки месторождений полезных ископаемых с низкой концентрацией в геологических формациях с высокой проницаемостью.

Несмотря на то, что Казахстан занимает второе место в мире по запасам урана, с оставшимися доступными запасами урана существуют значительные извлекаемые проблемы. На сегодняшний день Казахстан разрабатывает месторождения дешевого урана с относительными затратами на эксплуатацию менее 80 долларов США за килограмм. Однако, согласно данным организации экономического сотрудничества и развития (OECD) за последние 15 лет запасы таких ресурсов сократилось почти на 55%, и осталось примерно 2,0 млн тонн ресурсов урана. В настоящее время необходимо эксплуатировать более глубокие минерализованные слои с меньшим количеством мелко- и среднезернистого песчаника, обогащенного глинистыми минералами.

В связи с чем, для лучшего контроля расхода кислоты и снижения производственных затрат на извлечение урана необходимо изменение подхода к планированию процесса добычи. Одним из возможных путей повышения рентабельности эксплуатации является проведения детального численного исследования как при геологическом моделировании, так и при проектировании геотехнологического полигона и режимов добычи на месторождении.

В ходе проведения детального анализа показано, что задача моделирования процесса добычи минерала методом ПВ является ресурсоемкой задачей и налагает определенные требования на вычислительные ресурсы. Ускорение расчетов при моделировании добычи урана с помощью ПВ может быть достигнуто за счет использования метода на

основе линий тока и технология параллельного вычисления на графическом процессоре (GPU).

Моделирование на основе линий тока позволяет выполнить преобразование 3D задачи в множество одномерных задач вдоль линий тока, которые легко подлежат параллелизации и ускорению вычислительного времени.

Цель работы. Разработка модели растворения минерала и массопереноса растворов при добыче урана методом подземного выщелачивания, учитывающей различные формы залежи урана и расход кислоты на растворение компонент породы, а также применении метода на основе линий тока и технологии параллельных расчетов на графических процессорах для ускорения расчетов.

Задачи работы.

- разработать эффективный алгоритм расчета поля давления в пласте на графическом процессоре (GPU) и исследовать влияние разницы плотностей раствора и грунтовых вод на гравитационное опущение раствора в пласте;
- выполнить анализ эффективности применения метода на основе линий тока для моделирования процесса добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания;
- разработать химическую модель реагирующего переноса, учитывающую расход кислоты на взаимодействие с породой при добыче урана методом подземного выщелачивания и определить скорости растворения соединений урана и компонент породы водным раствором серной кислоты;
- исследовать влияние скорости фильтрации раствора на извлечение урана методом ПСВ;
- исследовать влияние минералогического состава породы на извлечение урана методом подземного выщелачивания;
- применить разработанную модель реагирующего переноса к полномасштабному участку месторождения.

Объектом исследования является процессы переноса реагирующей смеси в пористых средах, возникающих при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания.

Предметом исследования является разработка модели переноса реагирующей смеси и массообмена в пористых средах и применение методов её эффективного исследования с использованием современных численных методов и высокопроизводительных вычислений.

Методы исследования. методы численного и аналитического исследования процессов растворения и переноса раствора в пористых средах с использованием параллельных вычислений и метода линий тока на основе алгоритма Поллока.

Научная новизна проблемы заключается: (i) в разработке физико-химической, математической и 3D численной моделей массообменных процессов в пористых средах, возникающих при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания с применением метода линий тока и ускорением расчетов на графическом процессоре; (ii) в установлении

закономерностей процессов фильтрации растворов, растворения минерала и переноса растворенных веществ в рудоносном пласте, учитывающих растворение соединений четырех и шестивалентного урана, и компонент породы.

Научные положения, выносимые на защиту.

- алгоритм расчета фильтрации раствора в породе с применением современных методов высокопроизводительных вычислений на графическом процессоре (GPU), с помощью которого достигнуто ускорение расчетов в 24 раза;
- гравитационное опущение раствора имеет существенное значение при разности плотностей раствора и грунтовых вод свыше 5%;
- приближенное аналитическое решение задачи массопереноса вдоль линии тока, полученное при допущениях однородного распределения минерала и постоянной скорости фильтрации раствора;
- математическая модель массообменных процессов в пористых средах, возникающих при добыче урана методом ПВ, учитывающая растворение UO_3 , UO_2 и рудовмещающей породы;
- константы скоростей растворения соединений UO_3 , UO_2 и рудовмещающей породы серной кислотой с отклонением (NRMSD) экспериментальной и расчетной концентрации урана на выходе из трубки не более 7%;
- увеличение скорости фильтрации с $0,59$ до $0,99$ м.сут⁻¹ приводит к сокращению извлечения урана на 6% и сокращению времени отработки на 65%.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертации определяется использованием фундаментальных законов механики: законов сохранения массы, Дарси и действующих масс при построении модели реагирующего переноса для моделирования физико-химических превращений в пористой среде, алгоритма Поллока для построения линий тока, а также применением апробированных достаточно точных численных методов для его исследования. Константы скоростей реакции взаимодействия выщелачивающего раствора с компонентами породы определены из известных экспериментальных данных материала месторождения Торткудук. Разработанная модель реагирующего переноса применена к полномасштабному участку Буденовское, результаты показали хорошее соответствие экспериментальных данных с результатами моделирования.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая значимость результатов заключается в разработке модели массопереноса процессов, возникающих при добыче урана методом подземного выщелачивания. Практическая значимость характеризуется возможностью применения разработанной модели для исследования процесса разработки урановых месторождений путем проведения расчета различных сценариев отработки для повышения эффективности извлечения минерала, прогноза эксплуатации месторождений, разрабатываемых методом подземного выщелачивания, а также анализа степени извлечения минерала.

Разработанная модель массопереноса и компьютерная программа являются частью проекта по разработке геотехнологического комплекса для анализа и оптимизации добычи урана методом ПСВ под названием «Geostat», которые прошли апробацию на месторождениях Орталык, Инкай и Семизбай.

Связь работы с государственными научными программами. Данная диссертационная работа выполнялась в рамках следующих проектов:

- 3290/ГФ4 «Разработка геотехнологического информационно-моделирующего комплекса для оптимизации добычи полезного компонента методом подземного скважинного выщелачивания», ГФ КН МОН РК, 2015 – 2017 гг., № ГР 0115РК00771;
- BR05236447 «Интеллектуальные системы управления и принятия решений для разработки месторождений урана и нефти», ПЦФ научных исследований КН МОН РК, 2018 – 2020 гг., № ГР 0118РК01275;
- AP19676743 «Разработка методов расчета схемы дебаланса растворов, режимов работы геотехнологического полигона и создание геотехнологической информационной системы для эффективной добычи подземным выщелачиванием», ГФ КН МОН РК, 2023-2025 гг., № ГР 0123РК00564.

Апробация работы.

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- 9th International Young Scientists Conference in Computational Science, September 5-13, 2020;
- IX-ая международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности», Алматы, 7 – 9 ноября 2019 года;
- International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2018), IAEA, Vienna, Austria, 25-29 June 2018
- Research for Integrative Numerical Geology (RING) meeting, Nancy, France, 2017;
- VIII-ая международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности», Астана, 3 – 5 августа 2017 года.

Индивидуальный вклад докторанта в подготовку статей.

Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке программного кода, получении и анализе результатов, оформлении статей. Имеет 3 публикации, входящих в БД Scopus (приведены ниже) и 3 статьи в журналах, рекомендуемых КОКШВО, является первым автором в 5 публикациях.

1. M.B. Kurmanseiit, M.S. Tungatarova, J.-J. Royer, etc. Streamline-based reactive transport modeling of uranium mining during in-situ leaching: Advantages and drawbacks. Hydrometallurgy, 2023, 220, 106107. (WoS: Q1, Scopus: процентиль -89, SJR -1.012)

2. Kurmanseiit, M.B.; Tungatarova, M.S.; etc. Reactive Transport Modeling during Uranium In Situ Leaching (ISL): The Effects of Ore Composition on Mining Recovery. Minerals 2022, 12, 1340. (WoS: Q2, Scopus: процентиль -68, SJR -0.53)

3. M.S. Tungatarova, M.B. Kurmanseit, N. Shayakhmetov GPU accelerated modeling of In-Situ Leaching process and Streamline based reactive transport simulation. - Procedia Computer Science. – 2020.– V. 178, p. 145-152, (WoS: Q2, Scopus: процентиль -68, SJR -0.507, Conference paper)

Кроме этого, автором диссертации были опубликованы 5 тезиса в трудах международных научных конференциях, в которых он являлся докладчиком, на программные модули, разработанные в рамках диссертационной работы, были получены 2 авторских свидетельства.

Основное содержание диссертации.

Во введении отражены следующие моменты: актуальность темы исследования, основные цели работы, новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, апробация работы на научных и научно-практических конференциях.

В первом разделе диссертационной работы рассматривается моделирование процесса фильтрации раствора в породе под действием сети скважин на примере однородного пласта с одной гексагональной ячейкой. Показано, что разность плотностей раствора и грунтовых вод вызывает гравитационное осаждение раствора при разнице свыше 5%. Для снижения вычислительного времени и требований к вычислительным ресурсам применен алгоритм параллелизации вычислений с выполнением расчетов на графическом процессоре (GPU).

Во втором разделе выполнено моделирование процессов массопереноса при извлечении урана методом ПВ на основе метода линий тока с применением параллелизации вычислений. Используя приближение 2-го порядка получено асимптотическое решение указанной системы для простой химической кинетики.

Во третьем разделе предложена модель реагирующего переноса, учитывающая растворение UO_3 , UO_2 и рудовмещающей породы при извлечении урана ПВ. Численно определены эмпирические константы скоростей реакций, выполнено исследование влияния скорости раствора и соотношения между соединениями четырехвалентного и шестивалентного урана на извлечение минерала. Разработанная модель реагирующего переноса применена к полномасштабному участку месторождения Буденовское.

Представлено заключение, где приведен анализ основных результатов с количественными данными, а также отражены оценка полноты решений поставленных задач, рекомендации по использованию результатов исследования, оценка технико-экономической эффективности внедрения и научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.