

ШАЯХМЕТОВ НУРЛАН МУРАТХАНОВИЧ

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

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

Общее описание работы. Диссертационная работа посвящена оптимизации режимов эксплуатации при разработке месторождений методом подземного скважинного выщелачивания. В диссертационной работе исследуются свойства схемы вскрытия, а также применение методики интенсификации для увеличения эффективности добычи.

Актуальность работы. Исторически снижение цен на уран было обусловлено появлением, в 2009 году, «дешевого» (<40 USD/кг) урана, добываемого методом подземного скважинного выщелачивания. Основным производителем этого урана являлся Казахстан с 28% от мировой добычи.

С тех пор цены на уран были относительно низкими, с редкими незначительными колебаниями. Однако в последние годы наблюдается возобновление интереса к атомной энергетике как к низкоуглеродному источнику энергии, что породило ожидания потенциального восстановления цен.

Существуют несколько методов добычи урана:

- добыча открытым способом – это наиболее распространенный метод добычи урана, при котором для доступа к залежам урана создаются большие открытые карьеры;
- шахтная добыча – в некоторых случаях месторождения урана могут быть слишком глубокими, чтобы добывать их открытым способом, для этого применяется шахтная добыча;
- подземное скважинное выщелачивание – это метод добычи, который включает закачку выщелачивающего раствора в рудоносный горизонт для растворения руды, которая затем откачивается на поверхность для переработки.

Подземное скважинное выщелачивание на долю которого приходится 97% добычи мировых извлекаемых запасов урана, является наиболее распространенным методом добычи урана из низко-концентрированных, дешевых, для добычи, месторождений. При этом необходимо отметить что рыночная стоимость урана с 2009 года остается в районе 40 USD/кг. В результате чего остальные методы добычи на данный момент являются не рентабельными.

Основной проблемой добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания является невозможность полного и прямого мониторинга процесса.

Разработанные методики, описанные в данной диссертационной работе, позволят определить оптимальные схемы размещения технологических скважин и реверсирования скважин с целью увеличения извлечения минерала.

Цель работы. Разработка методик и программы для оптимизации режимов эксплуатации при разработке месторождений методом подземного скважинного выщелачивания.

Задачи работы.

- исследование математической модели гидродинамических и химических процессов с целью оптимизации процессов, происходящих при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания;
- разработка методики для определения наилучшей схемы вскрытия месторождения, основанной на разработанной физико-химической модели процесса добычи минерала с использованием метода подземного скважинного выщелачивания;
- разработка методики для определения наиболее эффективного режима реверсирования.

Методы исследования. Методы моделирования массопереноса в пористых средах с учетом химических взаимодействий между компонентами; методы решения систем дифференциальных уравнений; методы оптимизации; информационные технологии для моделирования и определения оптимальных характеристик схем вскрытия.

Научная новизна проблемы в создании и автоматизации выбора расстояния между скважинами, в результате чего на основе математического моделирования и методов оптимизации будет предложена оптимальная схема вскрытия с координатами скважин. Данные методики также оформлены в виде модуля, интегрированного в программный продукт с интерфейсом и визуализатором. На данный момент на месторождениях Казахстана выбор схемы вскрытия осуществляется за счет рекомендаций не учитывающих специфичных свойств отдельного блока или месторождения. Предложенные методика и программный продукт обеспечивают учет этих свойств.

Представленное, в данной диссертационной работе, исследование позволяет определить характер изменения степени отработки с и без применения реверсирования для сравнения эффективности добычи. А также на основе результатов исследования представляются время реверсирования, и схема расположения скважин при которых достигается максимальная эффективность применения техники реверсирования скважин.

Обе задачи представленные в данной работе требуют одинаковых условий для сравнения схем расположения скважин и режимов реверсирования что в свою очередь может быть осуществлено только на основе математического моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту.

- алгоритм автоматического расположения скважин с учетом балансовых запасов, а также их распределения;

- методика автоматического определения оптимального расстояния между скважинами с учетом геологических свойств пласта, геотехнологических параметров добычи, капитальных и эксплуатационных затрат на основе математической модели гидродинамических и физико-химических процессов;
- реверсирование скважин позволяет увеличить эффективность добычи от 3-18% при рядном расположении скважин с учетом стоимости сооружения универсальных скважин;
- эффективность гексагональной схемы расположения скважин в среднем была на 26,2% выше рядной схемой без использования технологии реверсирования скважин при одинаковых значениях степени извлечения;
- наиболее эффективным сценарием является тот, в котором реверсирование скважин осуществляется непосредственно после момента, когда средняя концентрация продуктивного раствора в добывающих скважинах достигает своего максимального значения.

Описание основных результатов исследования.

- было определено что зависимость между временем достижения растворов и расстоянием между скважинами является нелинейным, что приводит к значительному увеличению времени отработки месторождения с увеличением расстояния между скважинами;
- наиболее оптимальным расстоянием между скважинами для минимизации суммарных расходов при гексагональной схеме расположения скважин является 42 метра. Что также согласуется с рекомендациями используемыми на предприятиях АО «НАК Казатомпром»;
- автоматизация расчетов была обеспечена путем разработки: алгоритма построения сетки скважин при заданном расстоянии между скважинами; методика поиска оптимального значения расстояния между скважинами; а также, программного модуля, интегрированного в комплекс для анализа и оптимизации добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания;
- определено что оптимальность в значительной части зависит от расположения граничных закачивающих скважин, т.е. в случае, когда граничные закачивающие скважины находятся вне зоны балансового минерала течение продуктивного раствора направлено на откачные скважины этого блока. В случае, когда граничные закачивающие скважины находятся внутри балансовой зоны течение продуктивного раствора будет направлено не технологического блока, если существуют соседние блоки необходимо чтобы по их периметру были расположены откачивающие скважины;
- при достижении сходных значений степени извлечения эффективность гексагональной схемы расположения скважин в среднем была на 26,2% выше, в сравнении с рядной схемой без использования реверсирования;
- количественный анализ указывает, что применение реверсирования на гексагональной схеме, в отличие от рядной, не существенно влияет на прибыльность производства при заданной степени извлечения минерала;
- анализ результатов экономической оценки двух вариантов реверсирования показал более высокую эффективность в обоих случаях по

сравнению с рядной схемой без реверсирования. Экономическая оценка выявила, что применение реверсирования имеет потенциал увеличить эффективность производства в пределах 3-18%, в зависимости от выбранного варианта реверсирования.

Научная новизна полученных результатов. В результате работ были разработаны методика и программное обеспечение которое позволяет, в автоматическом порядке, определить оптимальную схему вскрытия, а также условия при которых применение реверсирования скважин является наиболее эффективным. В рамках работ были опубликованы 3 статьи в зарубежных научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science и 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования РК для опубликования основных результатов научной деятельности.

Практическая значимость работы. Практическая значимость характеризуется возможностью применения разработанных методик автоматического построения и определения расстояния между скважинами непосредственно на месторождениях на этапе проектирования. А также рекомендации по реверсированию скважин может быть использовано для повышения эффективности добычи на этапе эксплуатации.

Методики, алгоритмы и результаты, представленные в данной диссертационной работе, являются частью проекта по разработке геотехнологического комплекса для анализа и оптимизации добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания. Некоторые методики были интегрированы в программный комплекс в виде модулей, а также данный комплекс применяется на добычных предприятиях «Орталык», «Инкай» и «Семизбай».

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

- BR05236447 «Интеллектуальные системы управления и принятия решений для разработки месторождений урана и нефти», программно-целевое финансирование научных исследований КН МОН РК, 2018 – 2020 гг., № ГР 0118РК01275;

- AP08052470 «Цифровая технология для рациональной посадки технологических скважин и управление их работой при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания», грантовое финансирование научных исследований КН МОН РК, 2020-2022 гг., № ГР 0120РК00063.

Индивидуальный вклад докторанта в подготовку статей.

- Shayakhmetov N.M., Alibayeva K.A., Kaltayev A., Panfilov I. Enhancing uranium in-situ leaching efficiency through the well reverse technique: A study of the effects of reversal time on production efficiency and cost // Hydrometallurgy. – 2023. – V. 219. – P. 106086. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106086> (Квартиль – Q1, Процентиль – 89, SJR – 1.012). Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке программного кода, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором.

– Shayakhmetov N.M., Aizhulov D.Y., Alibayeva K.A., Serovajsky S., Panfilov I. Application of hydrochemical simulation model to determination of optimal well pattern for mineral production with In-Situ Leaching // *Procedia Computer Science*. – 2020. – № 178. – P. 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.11.010> (Квартиль – Q2, Процентиль - 68, SJR – 0.507). Автор диссертации участвовал в постановке задачи, методики определения оптимальной схемы вскрытия, разработке программного кода, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором.

– Shayakhmetov N.M., Kurmanseiit M.B., Aizhulov D.Y. Study of the optimality of hexagonal well location modes during the in-situ leaching of mineral // *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra*. – 2019. – № 2. – P. 76-82. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.19> (Квартиль - Q3, Impact Factor – 0.7). Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке методики определения оптимальной схемы расположения скважин, разработке программного кода, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором.

– Shayakhmetov N.M., Kurmanseiit M.B., Aizhulov D.E. Modeling of the mineral leaching process by in-situ leaching method // *Вестник КазНПУ им. Абая*. – 2018. – Т. 63. – № 3. – С. 309-315. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке, математической и численной моделях, разработке программного кода, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором.

– Shayakhmetov N.M., Alibayeva K.A., Aizhulov D.Y. Identification and research of factors affecting the optimal distribution of well flow rates in space // *Вестник НИА РК*. – 2021. – Т. 82. – № 4. – С. 204-214. <https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.134>. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке программного кода, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором.

– Shayakhmetov N.M., Kurmanseiit M.B., Alibayeva K.A. Gravity effect on well screens alignment during the in-situ leaching // *Вестник КазНПУ им. Абая*. – 2022. – Т. 70. – № 3. – С. 91-98. <https://doi.org/10.51889/7670.2022.18.32.011>. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке программного кода, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором.

Кроме этого автором диссертации были опубликованы 5 тезисов международных научных конференциях в 4 из которых он являлся докладчиком. А также были получены 5 авторских свидетельств на методики и соответствующие программные модули разработанных в рамках диссертационной работы.