
**МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
MATHEMATICAL SCIENCES
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

МРНТИ 28.17.23, 30.17.51
УДК 532.546.3, 519.688

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-186-198>

^{1,2,3}**Калтаев А.,**

д.ф.-м.н., профессор, академик НАН РК при Президенте РК,
ORCID ID: 0000-0003-2180-2785,
e-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com

¹**Құрмансейіт М.Б.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5334-6537,
e-mail: kurmanseiit.maksat@gmail.com

^{1,2,*}**Тунгатарова М.С.,**

PhD, Dr. Eng., ORCID ID: 0000-0003-3138-3326,
*e-mail: m.tungatarova@satbayev.university

¹Казахский национальный исследовательский
технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²Институт механики и машиноведения
им. академика У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан

³Национальная академия наук
при Президенте Республики Казахстан, г. Алматы, Казахстан

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА****Аннотация**

В данной работе разработана и представлена имитационная модель процесса подземного выщелачивания урана, разработанная с учетом сложной кинетики растворения соединений четырех- и шестивалентного урана, а также рудовмещающей породы при взаимодействии с выщелачивающим раствором. Для определения констант скоростей реакции были использованы экспериментальные данные по извлечению урана из образца руды, помещенного в трубку с проточной схемой выщелачивания. На основании анализа экспериментальных кривых извлечения урана были определены константы скоростей основных реакций между соединениями урана и компонентами руды с выщелачивающим реагентом. Полученные параметры легли в основу численного моделирования, которое позволило прогнозировать динамику извлечения урана во времени. Разработанная модель была апробирована на данных полевого эксперимента, проведенного на участке месторождения Буденовское. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными кривых извлечений показало хорошее совпадение, что подтверждает достоверность модели и ее практическую применимость для прогнозирования и оптимизации технологических процессов подземного выщелачивания урана.

Ключевые слова: подземное выщелачивание урана, химическая модель процесса, математическая модель процесса, моделирование процесса добычи, константы скоростей реакции, кривая извлечения.

Введение

В условиях прогрессирующего истощения большинства высококачественных и легкоразрабатываемых месторождений полезных ископаемых все более актуальным становится применение технологий извлечения металлических соединений методами химического и биохимического выщелачивания – как в условиях их природного залегания (*in situ leaching*, рисунок 1), так и из выщелачивающих куч (*heap leaching*, рисунок 2). Эти подходы формируют устойчивую тенденцию в развитии современных технологий горнодобывающей промышленности [1, 2].

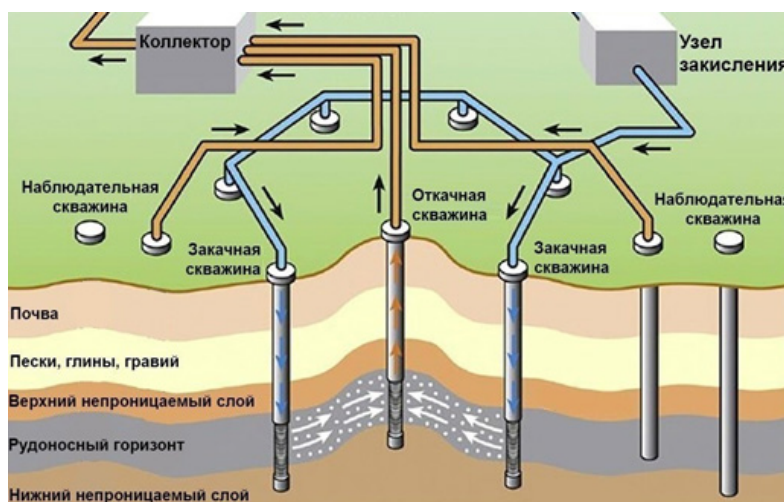


Рисунок 1 – Схема подземного скважинного выщелачивания

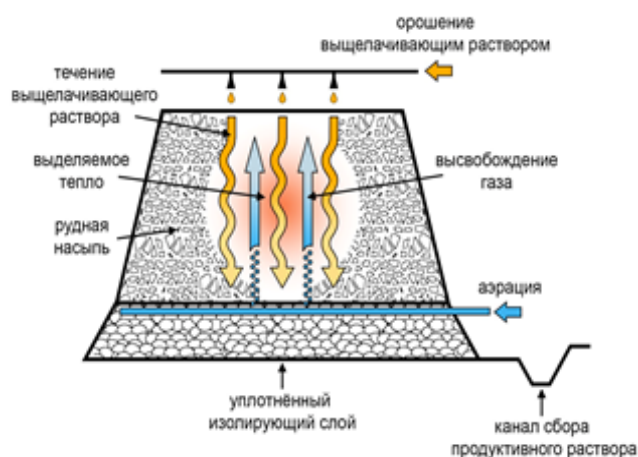


Рисунок 2 – Схема кучного выщелачивания

Наиболее перспективной технологией извлечения соединений металлов непосредственно в зоне залегания руд является метод подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), широко применяемый при разработке инфильтрационных месторождений.

Инфильтрационные урановые месторождения Казахстана характеризуются относительно низким содержанием урана в рудном материале и высокой проницаемостью вмещающих пород, что обуславливает целесообразность и эффективность их промышленной разработки методом подземного скважинного выщелачивания.

Формирование (генезис) указанных месторождений связано с выщелачиванием урансодержащих минералов кислородсодержащими подземными водами, поступающими с горных массивов Тянь-Шаня (рисунок 3). В процессе фильтрации через пористые и рыхлые песчаники растворенный уран, а также сопутствующие элементы (в первую очередь железо и сера) мигрируют в направлении понижения окислительно-восстановительного потенциала, где в восстановительных условиях, осаждаются в виде урановых минералов – преимущественно настурана ($\text{UO}_2 - \text{U}_3\text{O}_8$) и коффинита ($\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$), а также пирита (FeS_2). В результате этих процессов формируются залежи урана типа roll-front [3, 4, 5, 6, 7].

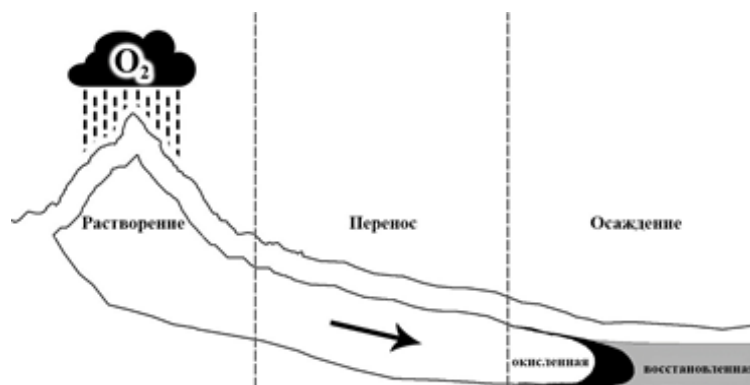


Рисунок 3 – Схема образования месторождений инфильтрационного типа

Технология подземного скважинного выщелачивания металлов подобна многократно ускоренному процессу естественного инфильтрационного перемещения минералов и включает следующие основные три этапа:

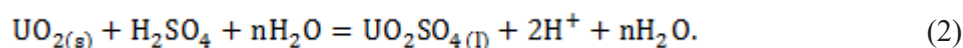
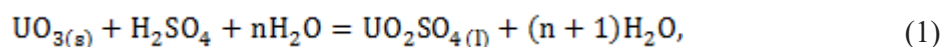
- ♦ с использованием закачных и откачных скважин фильтрация химического или биохимического растворителя сквозь рудосодержащую пористую среду,
- ♦ перевод целевого металла и/или его соединений из твердого в жидкое состояние с помощью растворителя и
- ♦ дальнейшая его транспортировка (перекачка) в места переработки.

В работе рассматривается модель подземного скважинного выщелачивания оксидов урана водным раствором серной кислоты и результаты исследований на их основе.

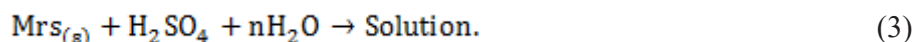
Материалы и методы

При подземном скважинном выщелачивании урана, который в месторождениях Казахстана часто встречаются в форме четырех- и шестивалентных оксидов урана $\text{UO}_{2(s)}$, $\text{UO}_{3(s)}$, в основном используются водные растворы серной кислоты H_2SO_4 . В силу приближенного характера данных по составу рудосодержащей породы в расчетной модели приняты относительно упрощенные химические брутто-реакции растворения, по которым происходит перевод оксидов урана и рудосодержащей породы из твердого в жидкое состояние [8, 9].

Растворение оксидов шести- и четырехвалентного урана $\text{UO}_{3(s)}$, $\text{UO}_{2(s)}$ серной кислотой описывается брутто-реакциями [10–12]



Часть рудосодержащей породы также может растворяться серной кислотой



Эти уравнения можно записать в единой форме

$$v_{i1}M_i + v_{i2}R + W = v_{i3}P + W, \quad (4)$$

где M_i – моли оксидов урана или рудосодержащей породы в твердой форме:

$$M_1 = [\text{UO}_{3(s)}], M_2 = [\text{UO}_{2(s)}], M_3 = [\text{Mrs}_{(s)}],$$

$$R = [\text{H}_2\text{SO}_4] \text{ – моли растворителя (серной кислоты),}$$

$$P = [\text{UO}_2\text{SO}_{4(l)}] \text{ – моли оксидов урана в растворенном виде,}$$

$$W = [\text{H}_2\text{O}] \text{ – моли воды,}$$

$$v_{ij} = 1 \text{ – стехиометрические коэффициенты реакций в трех уравнениях ((1)–(3)), } i, j = 1, 2, 3.$$

Фильтрация химического растворителя, растворенного минерала и рудосодержащей породы сквозь пористую среду описывается законом сохранения масс

$$-\nabla \cdot (v\phi) = \sum_{in} Q_{in} \delta(x - x_{in}, y - y_{in}) - \sum_{pr} Q_{pr} \delta(x - x_{pm}, y - y_{pm})$$

и законом Дарси

$$\vec{v}\phi = -K\nabla h, \quad (5)$$

где $\vec{v}$ – вектор средней скорости жидкости в порах, ϕ – пористость среды, K – коэффициент фильтрации, $h = p/\rho g$ – гидродинамический напор в пласте, Q_{in}, Q_{pr} – расходы на закачных и откачных скважинах ($Q_{in}, Q_{pr} > 0$), $u = v\phi$ – скорость Дарси жидкости в пористой среде, $u = |u|$.

Эти два уравнения сводятся к одному 3D эллиптическому уравнению относительно гидродинамического напора

$$\nabla \cdot (K\nabla h) = \sum_{in} Q_{in} \delta(x - x_{in}, y - y_{in}) - \sum_{pr} Q_{pr} \delta(x - x_{pm}, y - y_{pm}) \quad (6)$$

и решаются численным методом при заданных значениях расходов жидкости на закачных и откачных скважинах. Вдали от скважин давление считается постоянным и равным $p = p_0$.

По найденному полю давления из закона Дарси (5) определяется поле скорости в межскважинном пространстве, затем с использованием алгоритма Поллока строятся линии тока [11, 12, 13].

На рисунке 4 наложением линий тока на поле гидродинамического напора показана взаимосвязь между полем давления и линиями тока. На рисунке 5 представлено трехмерное изображение линий тока в межскважинном пространстве для реального блока месторождения, состоящего из 30 закачных и 8 откачных скважин с расстоянием между скважинами 45 м. Цвет линий тока указывает на принадлежность к соответствующей закачной скважине.

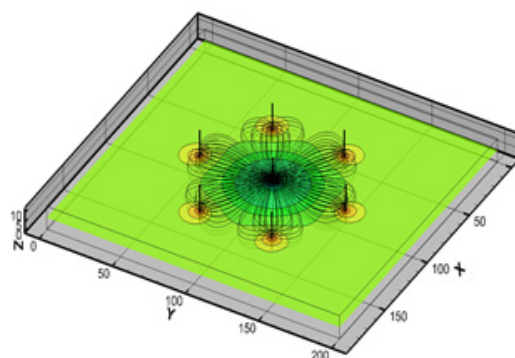


Рисунок 4 – Линии тока течения в одной гексагональной ячейке, наложенные на изолинии давления (желто-светлые цвета), 389 линии тока ($9 \times 7 \times 6$), [10, 12]

Наличие пространственного распределения линий тока и выщелачивающего раствора вдоль них позволяет получить представление о характере движения жидкости в зависимости от геологической структуры пласта, а также контролировать растекание раствора за пределы зоны разработки месторождения. На рисунке 6 показано распределение линий тока для расположения скважин, аналогичное рисунку 5, однако цвет линий тока характеризует концентрацию выщелачивающего раствора вдоль линии тока, где красный цвет соответствует максимальной концентрации реагента, синий – минимальной.

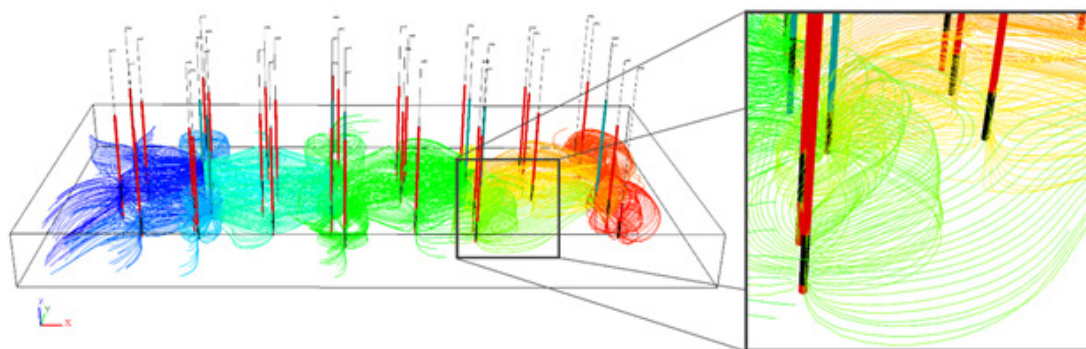


Рисунок 5 – 3D-изображение линий тока в межскважинном пространстве в определенный момент времени работы 38 скважин: 30 закачных и 8 откачных

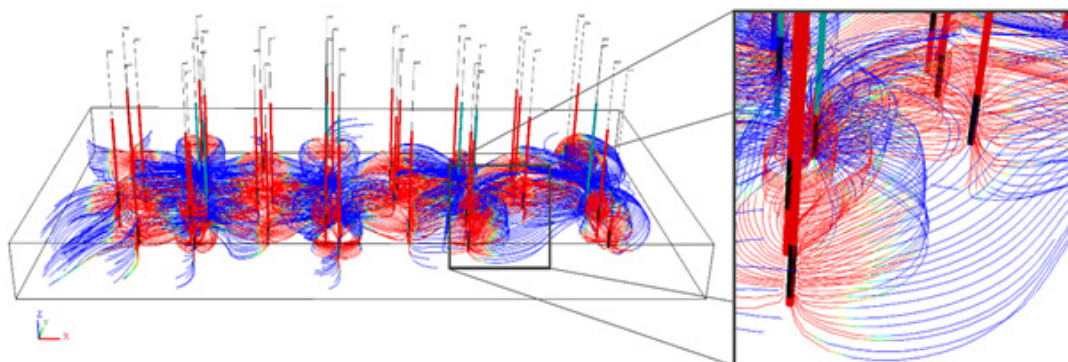


Рисунок 6 – Распределение выщелачивающего раствора вдоль линий тока между скважинами

Согласно брутто-реакциям (1–3) как скорости перехода четырех- и шестивалентных соединений урана и рудосодержащей породы из твердого в жидкое состояние, так и скорости расхода растворителя и образования соответствующих соединений урана и рудных компонентов в жидкой фазе описываются тремя уравнениями:

$$-dM_i/dt = -dR/dt = dP/dt = dW/dt = W_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

Соответственно, скорости растворения оксидов урана и рудосодержащей породы в твердых формах можно описать следующими дифференциальными уравнениями

$$\partial((1 - \phi)C_{Mi}) / \partial t = -W_i, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

с соответствующими начальными распределениями минералов в пласте

$$C_{Mi}(x, t = 0) = C_{Mi}^0(x),$$

где $C_{Mi} = [M_i]$ – молярные концентрации шестивалентного $U(VI)$ и четырехвалентного $U(IV)$ оксидов урана и рудосодержащей породы Mrs в твердых фазах.

В соответствии с законом действующих масс скорости реакций W_i [л/моль /сут], согласно химическим реакциям (1–3), записаны в виде [12–13]

$$W_i = k_{Mi} C_{Mi} C_R, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (8)$$

где $C_R = [R]$ – молярная концентрация растворителя, $k_{M1} = k_{U(VI)}$, $k_{M2} = k_{U(IV)}$, $k_{M3} = k_{Mn}$ [л/моль/сут] – константы скорости растворения, определяемые из известных экспериментальных данных, $k_{Mi} > 0$.

Изменения концентрации растворителя C_R и соединений урана в жидкой фазе $C_p = [P]$, вызванные фильтрацией выщелачивающего растворителя через пористую среду, согласно химическим реакциям (1–3) описываются уравнениями реагирующего массопереноса [12–13]

$$\partial(\phi C_R)/\partial t + \nabla \cdot (\phi C_R \vec{v}) = \nabla \cdot (\phi D_d \nabla C_R) - (W_1 + W_2 + W_3) \quad (9)$$

$$\partial(\phi C_p)/\partial t + \nabla \cdot (\phi C_p \vec{v}) = \nabla \cdot (\phi D_d \nabla C_p) + (W_1 + W_2) \quad (10)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$C_R(x, t = 0) = 0, \quad C_R(x = x_0, t) = C_R^0(s, t),$$

$$C_p(x, t = 0) = 0, \quad C_p(x = 0, t) = 0.$$

Коэффициент гидродинамической дисперсии в пористой среде D_d зависит от компонент скорости и определяется как $D_d = f(|\vec{v}|)$ [14].

Для определения констант скорости реакции и построения имитационной модели растворения соединений урана использованы экспериментальные данные, полученные в работе [15].

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрическую трубку радиуса $r = 0,15$ м и длиной $l = 1,0$ м, в которую с постоянным расходом подается выщелачивающий раствор с постоянной концентрацией серной кислоты. Эксперименты проведены для двух режимов, отличающихся концентрацией серной кислоты в подаваемом растворе: 1 – $H_2SO_4 = 30 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$; 2 – $H_2SO_4 = 20 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$. На выходе из трубки измеряется концентрация растворенного минерала через равные интервалы времени.

Результаты и обсуждение

Константы скорости растворения k_{Mi} определены сравнением результатов численного моделирования на основе уравнений (7–10) с соответствующими начальными и граничными условиями, с экспериментальными данными концентраций оксидов урана на выходе из трубки [15] и равны [13]

$$k_{U(VI)} = 4.40; \quad k_{U(IV)} = 0.6; \quad k_{Mn} = 0.5 \quad [\text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}].$$

На рисунке 7 приведены результаты сравнения экспериментальных данных по концентрации урана на выходе из трубки для обоих режимов с результатами численного моделирования при данных значениях констант скоростей реакции. Как видно, согласие вполне удовлетворительное.

С использованием разработанной модели получены распределения реагента (а), растворенных оксидов урана (б) и оксидов урана в твердой фазе (с) вдоль трубки для моментов времени $t_1 = 12$ часов, $t_2 = 22$ часа $t_3 = 32$ (рисунки 8 и 9). Полученные результаты показывают, что в процессе движения по трубке выщелачивающий раствор переводит уран из твердой в жидкую фазу.

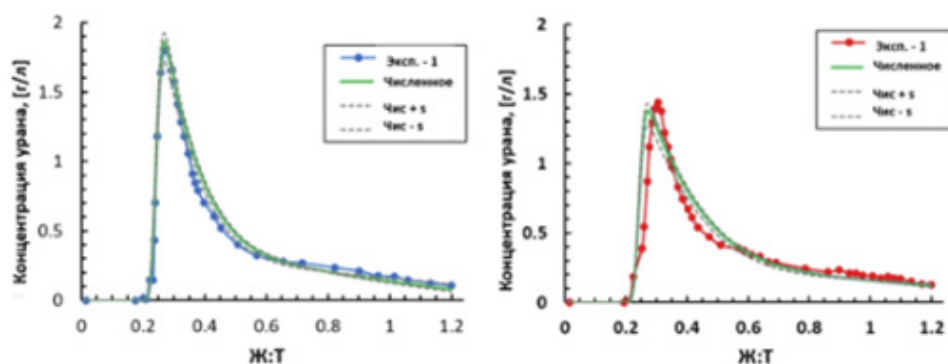


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных значений концентраций урана на выходе из трубки, построенных относительно отношения Жидкость:Твердое тело = $(\rho_1 Q)/(\rho_s V_s) \cdot t$ [15], с результатами 1D численного моделирования для двух режимов: слева – $H_2SO_4 = 30 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ и справа – $H_2SO_4 = 20 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$

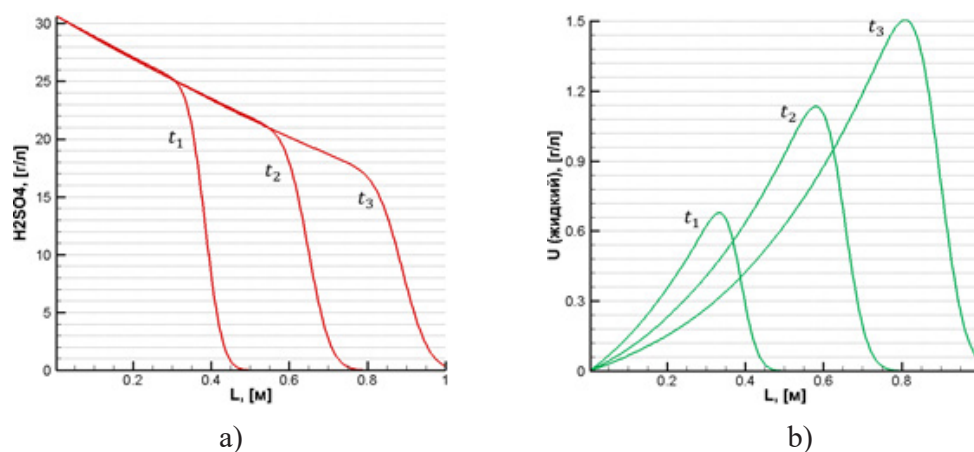


Рисунок 8 – Распределение растворителя (a) и растворенных оксидов урана (b) в моменты времени $t_1 = 12$ часов, $t_2 = 22$ часа $t_3 = 32$ часа вдоль трубки

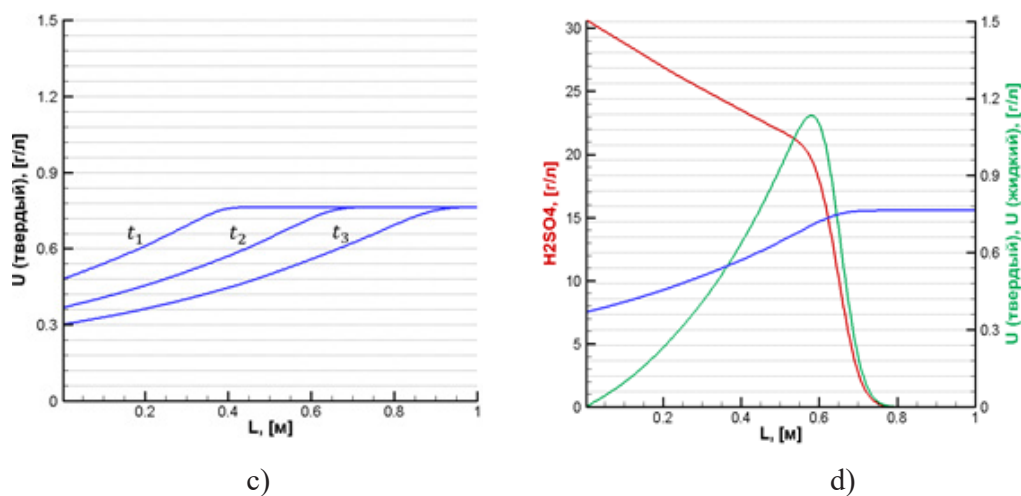


Рисунок 9 – Распределение вдоль трубки оксидов урана в твердой фазе в моменты времени $t_1 = 12$ часов, $t_2 = 22$ часа $t_3 = 32$ часа (c) и реагента, оксидов урана в твердой и жидкой фазах (d) в момент времени $t_2 = 22$ часа

Разработанная математическая модель и установленные значения скорости реакции были использованы для моделирования истории отработки на полномасштабном полевом участке подземного скважинного выщелачивания месторождения Буденовское [16, 17].

Общая площадь экспериментального блока 23700 m^2 со средней производительностью урана $15.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Участок разрабатывался сетью скважин из 4 гексагональных ячеек с 18 закачными и 4 откачными скважинами, обозначенными красными и синими точками соответственно. Согласно [17] заданы мощность пласта $h = 11.28 \text{ m}$ со средней концентрацией урана в породе C_U , фильтрационные свойства $K = 7.0 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$ и пористость породы $\phi = 0.22$. Предполагалось, что содержание урана в породе $C_U = 0.077$ при равном соотношении U(IV) и U(VI).

На рисунке 10 показано поле гидродинамического напора, наложенное с распределением линий тока, для участка месторождения Буденовское. На рисунках 11–13 показано распределение реагента, оксидов урана в твердой фазе и растворенных оксидов урана, наложенное с линиями тока на момент времени $t=270$ суток.

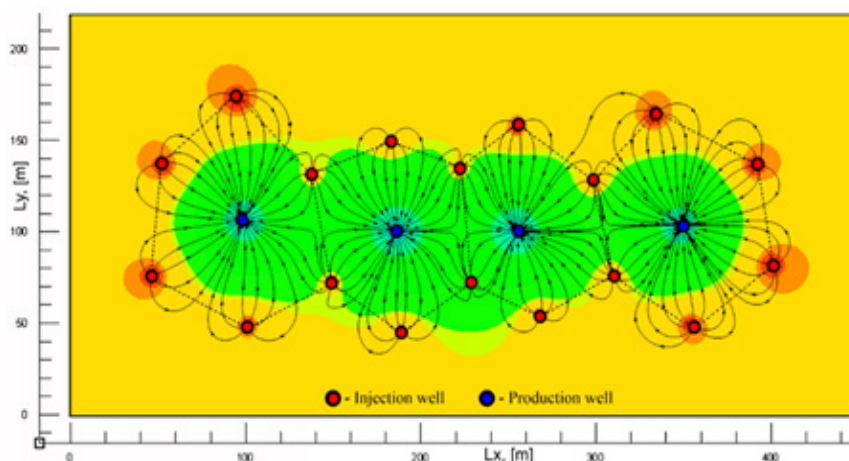


Рисунок 10 – Распределение давления и линий тока
в пласте в момент времени $t = 270$ суток

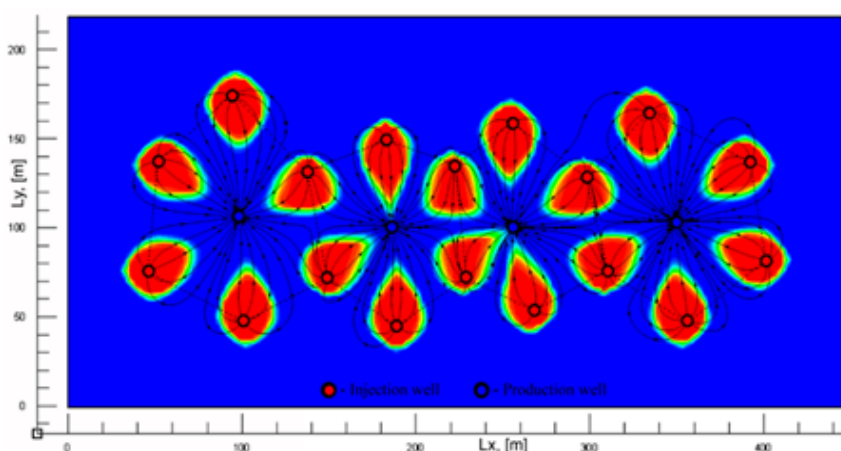


Рисунок 11 – Распределение реагента и линий тока в пласте
в момент времени $t = 270$ суток

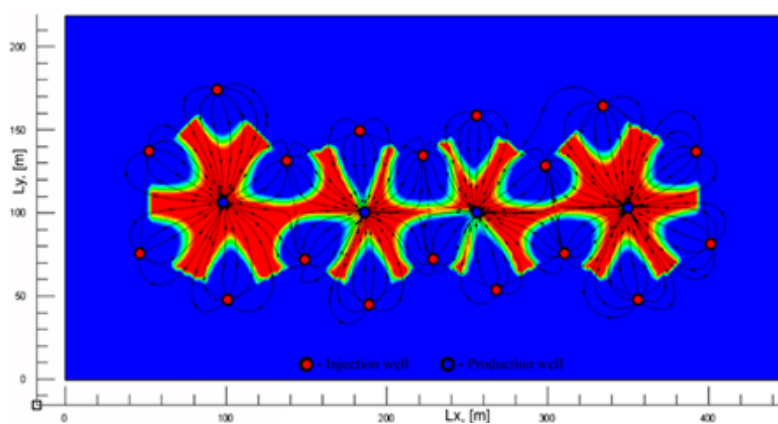


Рисунок 12 – Распределение оксидов урана в твердой фазе и линий тока в пласте в момент времени $t = 270$ суток

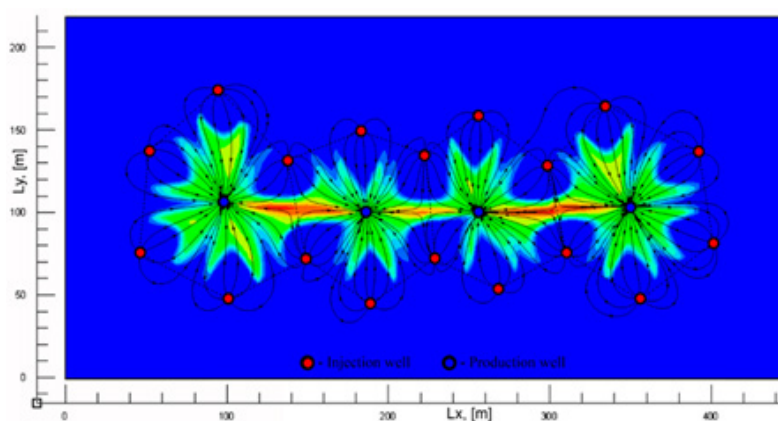


Рисунок 13 – Распределение растворенных оксидов урана и линий тока в пласте в момент времени $t = 270$ суток

Проведены сравнения экспериментальной и численной зависимости кривой извлечения оксидов урана от времени (рисунок 14) и изменения со временем экспериментального и численного результатов степени извлечения оксидов урана (рисунок 15), которые находятся в удовлетворительном согласии.

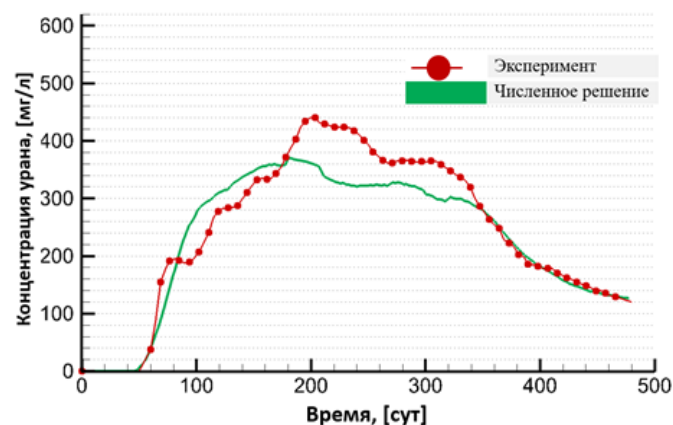


Рисунок 14 – Сравнение экспериментальной и численной зависимости кривой извлечения от времени

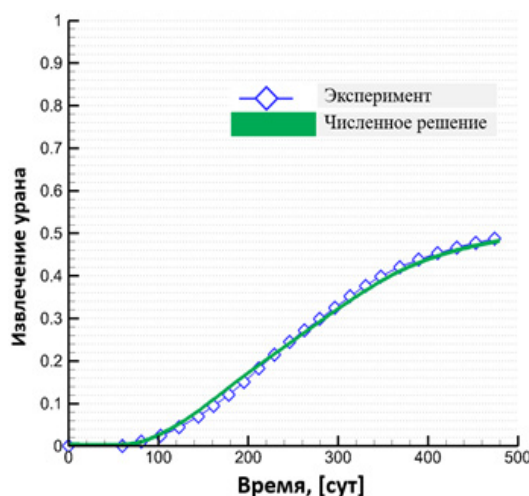


Рисунок 15 – Сравнение изменения со временем экспериментального и численного результатов извлечения урана

С использованием данной модели выполнена серия расчетов, направленных на исследование влияния концентрации серной кислоты на скорость растворения оксидов урана, а также на степень их извлечения.

На основе проведенных расчетов и комплексных исследований разработана система управления производственными процессами добывающих подразделений. Она обеспечивает реализацию функций прогнозирования, планирования, мониторинга и оперативного управления процессом извлечения урана на всех этапах его промышленной разработки.

Заключение

Разработана трехмерная вычислительная модель процесса подземного скважинного выщелачивания урана, представленного в месторождениях Казахстана преимущественно в виде четырех- и шестивалентных оксидов $UO_{2(s)}$ и $UO_{3(s)}$.

Модель описывает следующие основные стадии процесса: нагнетание водного раствора серной кислоты в рудоносный пласт через скважины; переход оксидов урана и минералов рудной породы из твердого состояния в раствор под воздействием кислоты; транспорт полученных растворенных соединений по пористой среде с учетом гидродинамической дисперсии и химических превращений, а также откачку продуктивного раствора, обогащенного ураном.

Константы скоростей растворения $UO_{2(s)}$, $UO_{3(s)}$ и рудной породы по брутто-реакциям (1–2) определены путем сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными и составляют:

$$k_{U(VI)} = 4.40; \quad k_{U(IV)} = 0.6; \quad k_{Mrs} = 0.5 \quad [l \cdot mole^{-1} \cdot day^{-1}].$$

Проведены валидационные расчеты разработанной вычислительной модели, результаты которых демонстрируют удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

С использованием данной модели выполнена серия расчетов, направленных на исследование влияния концентрации серной кислоты на скорость растворения оксидов урана, а также на степень их извлечения.

На основе проведенных расчетов и комплексных исследований разработана система управления производственными процессами добывающих подразделений. Она обеспечивает реализацию функций прогнозирования, планирования, мониторинга и оперативного управления процессом извлечения урана на всех этапах его промышленной разработки.

Разработанные программные обеспечения переданы Институту высоких технологий НАК «Казатомпром» в рамках договора на выполнение работ по его созданию. Они внедрены в эксплуатацию в двух горнорудных управлениях. Кроме того, НАК «Казатомпром» приобрела лицензию на право использования указанных программных решений.

Разработанные математическая и вычислительная модели подземного скважинного выщелачивания оксидов урана, а также методика их практического применения могут быть адаптированы и использованы для извлечения других минералов при наличии соответствующих геологических и гидрологических условий на месторождениях.

Информация о финансировании. Исследования проводились в рамках программы фундаментальных исследований Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (номер гранта: BR20280990).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Batterham R., Robinson D. The future of mining: will in place recovery ever come of age? // Proc. of the IMPC Conf. – 2018. – Режим доступа: www.researchgate.net/publication/323655569 (дата обращения: 31.05.2025).
- 2 Dixon D., Hendrix J. Theoretical Basis for Variable Order Assumption in the Kinetics of Leaching of Discrete Grains // AIChE J. – 1993. – Vol. 39. – No. 5. – P. 904–907.
- 3 Dahlkamp F.J. Uranium Deposits of the World (Asia). – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 492 p.
- 4 Мамилов В.А. Добыча урана методом подземного выщелачивания. – М., 1980.
- 5 Fyodorov G.V. Uranium deposits of the Inkay-Mynkuduk ore field. – Kazakhstan, 1999. – 25 p.
- 6 Developments in uranium resources, production, demand and the environment: Proceedings of a Technical Committee Meeting, Vienna, 15–18 June 1999. – Vienna: IAEA, 1999. – 230 p. – (IAEA-TECDOC-1425).
- 7 In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. – 128 p. (Nuclear Energy Series, No. NF-T-1.4).
- 8 Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана. – М.: Атомиздат, 1978. – 326 с.
- 9 Ho E., Quan C. Iron(II) oxidation by SO_2/O_2 for use in uranium leaching // Hydrometallurgy. – 2007. – Vol. 85. – P. 183–192.
- 10 Kurmanseit M.B., Tungatarova M.S., Kaltayev A., Royer J.-J. Reactive transport modeling during uranium in situ leaching (ISL): the effects of ore composition on mining recovery // Minerals. – 2022. – Vol. 11. – Article no. 1340. <https://doi.org/10.3390/min12111340>
- 11 Batycky R.P., Blunt M.J., Thiele M.R. A 3D field-scale streamline-based reservoir simulator // SPERE. – 1997. – November. – P. 246.
- 12 Kurmanseit M.B., Tungatarova M.S., Royer J.-J., Aizhulov D.Y., Shayakhmetov N.M., Kaltayev A. Streamline-based reactive transport modeling of uranium mining during in-situ leaching: advantages and drawbacks // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 220. – Article no. 106107. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106107>
- 13 Курмансеит М.Б. Исследование физико-химических процессов при добыче минералов методом выщелачивания. Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). – Алматы: КазНУ, 2024.
- 14 Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1971.
- 15 Поезжаев И.П., Панова Е.Н., Буленова К.Ж., Карманов Е.М., Блынский П.А., Блынский О.А., Битов О.А. Геотехнология урана. – Алматы: АО «НАК Казатомпром», 2017. – 319 с.
- 16 Патрин А.П., Забазнов В.Л., Чистилин П.Е. Основные результаты полномасштабного натурного опыта по ПСВ урана на участке № 2 месторождения Буденовское // Актуальные проблемы урановой промышленности: сб. докл. V науч.-практ. конф. – Алматы: АО «НАК Казатомпром», 2008. – С. 198–204.
- 17 Подрезов Д.Р. Разработка и идентификация моделей оценки запасов рудника подземного скважинного выщелачивания урана. Диссертация... – Москва: Университет науки и технологий МИСИС, 2021. – 175 с.

REFERENCES

- 1 Batterham, R. and Robinson, D. Proc. of the IMPC Conf. (2018). Available at: www.researchgate.net/publication/323655569 [accessed 31 May 2025].
- 2 Dixon, D. and Hendrix, J., *AIChE J.* 39, 904–907 (1993). <https://doi.org/10.1002/aic.690390520>
- 3 Dahlkamp, F.J. *Uranium Deposits of the World (Asia)* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009), 492 p.
- 4 Mamilov, V.A. *Dобыча урана методом подземного выщелачивания* (Moscow, 1980). (in Russian).
- 5 Fyodorov, G.V. *Uranium deposits of the Inkay-Mynkuduk ore field (Kazakhstan, 1999).*
- 6 Proc. of the Tech. Comm. Meeting on Developments in Uranium Resources Production Demand and the Environment (Vienna, 15–18 June, 1999), IAEA-TECDOC-1425.
- 7 *In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations*, Int. At. Energy Agency (IAEA), Nucl. Energy Ser., No. NF-T-1.4 (Vienna, 2016), 128 p.
- 8 Gromov, B.V. *Introduction to Chemical Technology of Uranium* (Moscow: Atomizdat, 1978), p. 326. (in Russian).
- 9 Ho, E. and Quan, C. *Hydrometallurgy* 85, 183–192 (2007).
- 10 Kurmanseit, M.B., Tungatarova, M.S., Kaltayev, A. and Royer, J.-J. *Minerals* 11, 1340 (2022). <https://doi.org/10.3390/min12111340>
- 11 Batycky, R.P., Blunt, M.J. and Thiele, M.R. *A 3D Field-Scale Streamline-Based Reservoir Simulator, SPERE* (November 1997), p. 246.
- 12 Kurmanseit, M.B., Tungatarova, M.S., Royer, J.-J., Aizhulov, D.Y., Shayakhmetov, N.M. and Kaltayev, A., *Hydrometallurgy* 220, 106107 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106107>
- 13 Kurmanseit, M.B. *Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov pri dobyche mineralov metodom vysshelachivaniya*, PhD thesis, KazNU, 2024. (in Russian).
- 14 Ber, Ya., Zaslavskiy, D. and Irmey, S., *Fiziko-matematicheskie osnovy filtratsii vody* (Moscow: Mir, 1971). (in Russian).
- 15 Poezhaev, I.P., Panova, E.N., Bulenova, K.Zh., Karmanov, E.M., Blynsky, P.A., Blynsky, O.A. and Bitov, O.A. *Geotekhnologiya urana* (Almaty: AO "NAK Kazatomprom", 2017), 319 p. (in Russian).
- 16 Patrin, A.P., Zabaznov, V.L. and Chistilin, P.E. Proc. of the V Sci.-Pract. Conf. on Actual Problems of Uranium Industry (Almaty: AO "NAK Kazatomprom", 2008), pp. 198–204. (in Russian).
- 17 Podrezov, D.R. *Razrabotka i identifikatsiya modeley otsenki zapasov rudnika podzemnogo skvazhinnogo vysshelachivaniya urana*, Cand. Sci. Thesis, MISIS, Moscow, Russia, 2021, 175 p. (in Russian).

^{1,2,3}**Калтаев А.,**

ф.-м.ғ.д., профессор, ҚР Президентінің жанындағы ҚР ҰҒА академигі,

ORCID ID: 0000-0003-2180-2785,

e-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com

¹**Құрмансейіт М.Б.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5334-6537, e-mail: kurmanseiit.maksat@gmail.com

^{1,2*}**Тунгатарова М.С.,**

PhD, Dr. Eng., ORCID ID: 0000-0003-3138-3326, *e-mail: m.tungatarova@satbayev.university

¹Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,

Алматы қ., Қазақстан

²Академик Ө.Ә. Жолдасбеков атындағы Механика және машина жасау институты,

Алматы қ., Қазақстан

³Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Ұлттық ғылым академиясы,

Алматы қ., Қазақстан

УРАНДЫ ШАЙМАЛАУ ПРОЦЕССІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Андатпа

Бұл жұмыста уранның төрт және алты валентті қосылыстарының, сондай-ақ сілтісіздендіру ерітіндісімен әрекеттесу кезіндегі кен жынысының еруінің күрделі кинетикасын ескере отырып, уранды жерасты шаймалау

процесінің имитациялық моделі жасалып, ұсынылды. Реакция жылдамдығының константаларын анықтау үшін кен үлгісінен алынған уранды тәжірибелік ағынды шаймалау схемасы бойынша сілтісіздендіру кезінде түтікке орналастырылған деректер пайдаланылды. Тәжірибелік уран өндіру графиктерін талдау негізінде уран қосылыстары мен сілтісіздендіру реагенттері және кен құрамындағы компоненттер арасындағы негізгі реакциялардың жылдамдық константалары анықталды. Алынған параметрлер уақыт бойынша уран өндіру динамикасын болжауға мүмкіндік беретін сандық модельдеудің негізі болды. Жасалған модель Буденовское кен орнында жүргізілген далалық тәжірибе деректері негізінде сынақтан өтті. Модельдеу нәтижелерін өндіру қисығы бойынша тәжірибелік деректермен салыстыру оның жоғары сәйкестігін көрсетті. Бұл модельдің сенімділігін және оны уранды жерасты шаймалау технологиялық процестерін болжау мен оңтайландыруда практикалық тұрғыда қолдану мүмкіндігін дәлелдейді.

Тірек сөздер: уранды жерасты шаймалау, химиялық процесс моделі, математикалық процесс моделі, тау-кен процесін модельдеу, реакция жылдамдығының константалары, өндіру қисығы.

^{1,2,3}**Kaltayev A.,**

Dr.Phys.-Math.Sc., Professor, Academician of the National Academy
of Sciences of the Republic of Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0003-2180-2785,
e-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com

¹**Kurmanseiit M.B.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5334-6537,
e-mail: kurmanseiit.maksat@gmail.com

^{1, 2*}**Tungatarova M.S.,**

PhD, Dr. Eng., ORCID ID: 0000-0003-3138-3326,
*e-mail: m.tungatarova@satbayev.university

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering,
Almaty, Kazakhstan

³National Academy of Sciences under the President of the Republic of Kazakhstan,
Almaty, Kazakhstan

MODELING AND STUDY OF THE URANIUM LEACHING PROCESS

Abstract

This study presents the development of a simulation model for the in-situ leaching (ISL) process of uranium, incorporating the complex kinetics of the dissolution of both tetravalent and hexavalent uranium compounds, as well as the interaction of the leaching solution with the ore-bearing host rock. To determine the reaction rate constants, experimental data were obtained from a flow-through leaching setup using a representative ore sample. Analysis of the resulting uranium extraction curves enabled the identification of the rate constants for the key chemical reactions between the ore constituents and the leaching reagent. These parameters were subsequently used as input for numerical simulations aimed at predicting the temporal dynamics of uranium recovery. The model was validated against field data collected from the Budenovskoye uranium deposit. The comparison between simulated and experimental extraction curves demonstrated strong agreement, thereby confirming the robustness and reliability of the model. The results underscore the model's potential for practical application in forecasting and optimizing the performance of in-situ leaching operations for uranium recovery.

Keywords: in-situ leaching of uranium, chemical model, mathematical model, modeling of extraction process, reaction rate constants, extraction curve.

Дата поступления статьи в редакцию: 02.06.2025