

УДК 622.775

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА ГИДРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА С ВЫСОКОПРОНИЦАЕМОМ ПЕСЧАНЫМ РЕПЕРОМ

Бейсекеев Ермак Шортанбаевич^{1,2},
yermek_f-81@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Воронцов Павел Юрьевич³,
pashen007@mail.ru

Дуйсебаева Толкын Сабыржанкызы⁴,
Tolkynsd@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² АО «НАК Казатомпром»,
Казахстан, 010000, г. Астана, ул. Сыганак, 17/12.

³ Уральский государственный горный университет,
Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

⁴ Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби,
Казахстан, 050000, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71

Актуальность исследования обусловлена наращиванием объемов добычи дешевого урана на месторождениях гидрогенного типа, который наиболее распространен на территории Республики Казахстан, в виду чего складывается постоянная потребность в оптимизации режима выщелачивания для повышения извлечения урана.

Цель: обоснование возможности оптимизации регулирования режима подземного скважинного выщелачивания на месторождениях урана с выдержанным песчаным репером и высокой проницаемостью за счет снижения скорости диффузного массопереноса для повышения извлекаемости и предотвращения вторичного рудогенеза.

Объекты: каротажные диаграммы и данные лабораторных исследований по скважинам блока X месторождения Моинкум Чу-Сарысульской урановорудной провинции.

Методы: физико-математическое моделирование, индукционное каротажное зондирование, гамма-каротаж, кавернометрия, термометрия, корреляция и анализ каротажных данных с использованием Curve Editor, GIK. Аппаратное обеспечение включает: ПИК-50, КСП-43, кавернометр НС, электротермометр ТЭГ, каротажная станция, блок сопряжения и коммутации БСК.

Результаты. Произведена корреляция данных электрокаротажа, гамма-каротажа, термометрии и кавернометрии скважинного фонда блока X месторождения Моинкум, полученных методами каротажа сопротивлений, каротажа потенциала собственной поляризации и индукционного каротажа с последующим анализом. На основании анализа выявлены геолого-технологические условия рудоизвлечения. Проанализированы особенности оруденения и закономерности техногенного воздействия на рудовмещающую породу. Разработаны оптимизационные решения для интенсификации добычи урана и контроля вторичного техногенного рудогенеза на основании факторов проницаемости пород рудовмещающей толщи. Доказана целесообразность контроля скорости диффузии в процессе выщелачивания путем изменения термобарического режима и вязкости раствора на опытных объектах месторождения Моинкум Чу-Сарысульской урановорудной провинции. Предложена методика расчета оптимальных параметров режима выщелачивания на основе особенностей диффузии в породах с различной проницаемостью.

Ключевые слова:

геофизические исследования, режим выщелачивания, добыча урана методом подземного скважинного выщелачивания, подземное скважинное выщелачивание, контроль отработки урана, добыча на гидрогенных месторождениях, оптимизация добычи урана.

Введение

На сегодняшний день наметилась тенденция к усилению роли атомной энергетики в обеспечении всевозрастающих потребностей в электроэнергии, для обеспечения которых традиционных источников определено недостаточно. В связи с этим встает весьма актуальный вопрос о развитии уранодобывающей промышленности, способной обеспечить поступательное развитие атомного энергетического комплекса.

Перспективы уранодобывающей промышленности в Республике Казахстан напрямую зависят от наращивания объемов добычи. В свою очередь, решение данной задачи опирается на совершенствование процесса отработки уже разведанных месторождений, в том числе за счет увеличения коэффициента извлечения урана. Соответственно, возможности и подходы к совершенствованию процесса добычи также весьма различаются.

Большинство урановорудных месторождений в Республике Казахстан относятся к пластово-инфильтрационному типу, существенно различаясь при этом по геолого-технологическим условиям отработки. На месторождениях, характеризующихся песчаным репером с однородными по фильтрационным свойствам рудовмещающими толщами, в сочетании с дисперсным характером оруденения, поддерживаются высокие скорости фильтрации, зачастую с повышенными концентрациями растворов, температуры и давления [1, 2]. Данные условия режима выщелачивания позволяют более эффективно производить добычу урана при дисперсном оруденении. Однако данные параметры способствуют усилению массопереноса в нижележащие прослои, что осложняет контроль процесса выщелачивания и создает предпосылки для техногенного рудообразования, снижающего в конечном счете эффективность отработки участков.

Сравнительно небольшой период отработки месторождений гидрогенного типа, связанный с началом применения метода подземного скважинного выщелачивания в 1970-х гг., предопределил активное развитие и совершенствование процесса добычи по мере накопления практического опыта.

На данном этапе проблема предотвращения вторичного рудогенеза на гидрогенных месторождениях с выдержанным песчаным репером характерна для большинства месторождений подобного типа, особенно находящихся на зрелой стадии отработки. Соответственно, изучение возможностей повышения добычи урана за счет оптимизации режима выщелачивания является на данном этапе весьма перспективным.

Основанием для реализации данного исследования принята идея, сформированная в процессе изучения влияния факторов проницаемости пород и режима выщелачивания на вторичное рудообразование. Идея, выдвинутая нами, предполагает необходимость контроля режима выщелачивания через сокращение скорости диффузного массопереноса в условиях высоких рисков вторичного техногенного рудогенеза на гидрогенных месторождениях урана с высокой проницаемостью пород.

В процессе исследования были решены следующие задачи:

- 1) произведено геофизическое исследование скважин технологического блока X месторождения Моинкум;
- 2) произведена корреляция, обработка и анализ каротажных диаграмм;
- 3) разработана модель оптимизации режима выщелачивания при исходных высоких рисках вторичного техногенного рудогенеза на примере скважин технологического блока месторождения Моинкум.

Методология исследования

Методы исследования включают:

- геофизические методы: индукционное каротажное зондирование, каротаж сопротивлений, каротаж

сопротивления собственной поляризации, кавернометрию, термометрию скважин, данные лабораторного опробования образцов пород;

- методы корреляции каротажных диаграмм;
- методы физико-математического моделирования, опирающиеся на положения о кинетическом диффузном процессе химической реакции в ходе выщелачивания, закон Дарси [3, 4].

Выбор методологии исследования опирается на ключевую проблему повышения эффективности процесса добычи урана при сокращении риска диффузного массопереноса в нижележащие породы при высокой однородности и высокой проницаемости рудовмещающей толщи [5].

Выбор методов исследования скважинного пространства продиктован технологическими особенностями сложившейся в АО «НАК Казатомпром» практики проведения геофизических исследований на месторождении Моинкум. Исследование геоэлектрического и радиационного профиля пород на месторождениях урана является одним из наиболее достоверных способов определения их свойств в силу того, что на большинстве скважин извлечение образцов и их лабораторное исследование производится лишь на этапе разбуря и, как правило, носит выборочный характер [6].

Критерием выбора опытных объектов скважинного фонда послужила достаточность данных по геофизическим исследованиям. Инструментальное обеспечение обработки данных составили программные среды: GIK, Curve Editor, Excel. Проведение геофизических исследований обеспечено приборами ПИК с рабочей частотой 150 кГц и рабочим разрешением в 0–2000 мСим/м, прибором электрокаротажа КСП, кавернометром НС, электротермометром ТЭГ, каротажной станцией с блоком сопряжения и коммутации БСК [6. С. 5–7].

Результаты исследования

Объект исследования расположен на территории наиболее крупной урановорудной провинции Казахстана, простирающейся в пределах Чу-Сарысуьской впадины на юге республики. Зоны оруденения контролируются контуром артезианского бассейна, представленного водоносными комплексами верхнего мела [7] (рис. 1).

Месторождение Моинкум дислоцировано на территории малоамплитудных поднятий допалеозой-ордовикских геосинклинальных и девонских орогенных комплексов к северо-востоку от хребта Каратау на рубеже Чуйской впадины и Южно-Моинкумского прогиба и простирается на 25 км, достигая ширины 30–60 км. Объекты технологического блока X, представленного в исследовании, расположены в пределах Уюкского рудоносного подгоризонта, мощность которого варьирует от первых метров до 60 м.

Особенностью строения водоносных комплексов месторождения Моинкум является отсутствие гидравлической связи между водоносными горизонтами верхнего палеоценового и нижнего верхнемелового водоносных комплексов. Встречаются как пресные,

так и слабоминерализованные воды, в связи с чем минерализация варьирует от 0,7 до 1,3 г/дм³. Руды месторождения классифицированы как бедные и рядовые, оруденение дисперсного типа [8].

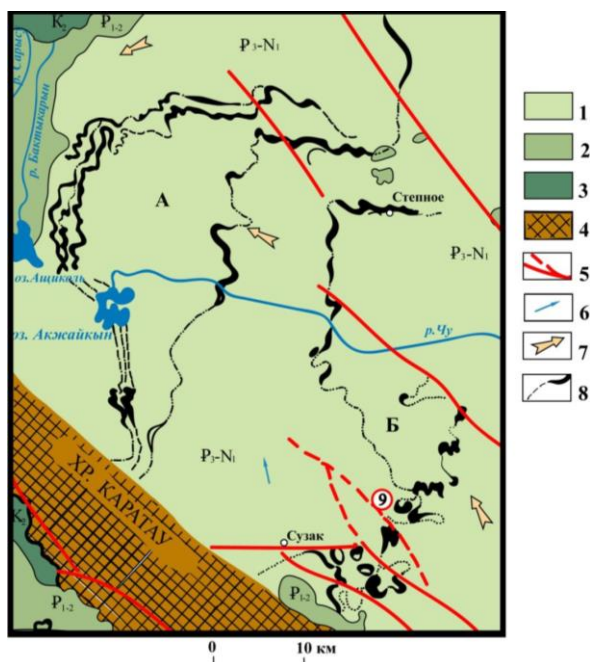


Рис. 1. Геологическая карта Чу-Сарысу́йской урановорудной провинции и местоположение месторождения Моинкум [1. С. 32]. Регионы: А) Инкай-Мынкудукский, Б) Уванас-Канжуганский; отложения: 1) глины, алевриты пески олигоцен-миоцена, 2) глины, пески палеоцен-эоцена, 3) пески, глины, алевриты, гравийники верхнего мела; 4) домезозойский фундамент; 5) разрывные нарушения; направления движения пластовых вод в отложениях: 6) эоцена, 7) верхнего мела; 8) границы выклинивания зон пластового окисления, 9) месторождение Моинкум

Fig. 1. Geological map of the Chu-Sarysu uranium ore province and the location of the Moinkum deposit [1. P. 32]. Regions: A) Inkai-Mynkuduk, B) Uvanas-Kanzhugan; deposits: 1) clays, siltstones, sands of the Oligocene–Miocene; 2) clays, sands of the Paleocene–Eocene; 3) sands, clays, siltstones, Upper Cretaceous gravels; 4) pre-Mesozoic basement; 5) discontinuous violations; directions of formation water movement in sediments: 6) Eocene, 7) Upper Cretaceous; 8) boundaries of outcrop zones of formation oxidation; 9) Moinkum deposit

На объектах исследования (скв. 1–4 технологического блока X) интервалы оруденения прерывистые, парные, расположены на глубинах в 207–239 м и характеризуются прослоями средне- и крупнозернистых гравийных песков, располагающихся над слоями средне- и мелкозернистых серо-зеленых песков, и глин. Рудовмещающие породы водонасыщенные, с хорошей проницаемостью [9].

Специфической особенностью технологического блока X является однородность мощных прослоев выше и ниже зон оруденения и наличие признаков продолжающегося естественного гидродинамическо-

го влияния на рудоносные породы – об этом свидетельствует менее выдержанная структура с прослоями илисто-глинистых пород по направлению движения пластовых вод [10, 11].

Результаты обследования скв. 1–4 методами каротажа потенциала собственной поляризации (ПС), гамма-каротажа (ГК), индукционного каротажа (ИК) и каротажа сопротивлений (КС) позволили выявить изменения зоны оруденения в процессе эксплуатации скважин, что дало возможность предположить наличие миграционных процессов в высокопроницаемых толщах и предпосылки интенсивного вторичного рудогенеза.

Однородные и высокопроницаемые слои в сочетании с дисперсным оруденением на объекте исследования предполагают оптимизацию режима выщелачивания с учетом достижения приемлемых объемов добычи урана, с одной стороны, и предотвращения массопереноса, с другой [12].

На месторождении Моинкум массоперенос преимущественно вертикальный, ярко выраженный, и может дополнительно усиливаться под воздействием высоких температур, повышения концентрации раствора и увеличения (вплоть до 50 м³/ч и выше) скоростей фильтрации [13, 14].

Для нивелирования данной проблемы существуют следующие возможности снижения интенсивности массопереноса за счет регулирования кинетических параметров выщелачивания [14–16].

Нами был предложен метод оптимизации добычи урана в хорошо проницаемых однородных толщах гидрогенных месторождений урана, апробированный на месторождении Моинкум (технологический блок X, скв. 1–4).

В основе предложенного метода лежит представление о кинетическом диффузном характере массопереноса с допущением относительной стационарности давления и температур, которые поддерживаются в соответствии с режимом выщелачивания.

Скорость выщелачивания определяется как диффузным, так и конвективным массопереносом. Взаимосвязь конвективного и диффузного переноса отражена в дифференциальном уравнении конвективной диффузии:

$$\frac{dC}{d\tau} + \omega_x \frac{dC}{dx} = D,$$

где $\frac{dC}{d\tau}$ – изменение концентрации компонента в элементе объема за единицу времени; $\frac{dC}{dx}$ – скорости потока в вертикальном направлении; ω_x – массовая доля растворенного вещества в долях единицы.

Скорость внешней диффузии на единицу объема реагирующей смеси можно определить по первому закону Фика: скорость диффузии пропорциональна коэффициенту молекулярной диффузии, поверхности переноса и градиенту концентрации.

В силу того, что химическое сопротивление при стационарном процессе ничтожно, скорость реакции определяется внешней и внутренней диффузией по формуле:

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{C_* F}{\frac{\delta_1}{D_1} + \frac{\delta_2}{D_2} + \frac{1}{K}}, \quad (1)$$

где $\frac{\delta_1}{D_1}$ – диффузное сопротивление (внешнее); $\frac{\delta_2}{D_2}$ – диффузное сопротивление (внутреннее); $\frac{1}{K}$ – химическое сопротивление; K – константа скорости прямой химической реакции; δ – толщина диффузного слоя, м; F – поверхность реагирования, м²; $\frac{dC}{d\tau}$ – скорость выщелачивания; d – толщина диффузионного слоя; C – концентрация выщелачивающего агента в объеме раствора и на внешней границе диффузионного слоя, моль/м³; D_1, D_2 – коэффициенты молекулярной диффузии в порах и твердом продукте соответственно, м²/с [3. С. 123–127].

В свою очередь, коэффициент внутренней диффузии определяется температурным режимом и вязкостью раствора:

$$D = \frac{T}{N_a} * \frac{1}{3\pi\mu d}, \quad (2)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии; T – температура; μ – вязкость раствора; N_a – число Авогадро; d – диффузная пленка Нернста, мм.

На месторождении Моинкум диффузная пленка Нернста составляет порядка 0,003 мм [3. С. 127–129; 17].

Далее мы преобразовали процесс из стационарного в динамический, в соответствии с законом Дарси, введя допущение о том, что скорость выщелачивания в большей степени определяется скоростью диффузии, чем скоростью химической реакции:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{DFdC}{dx}, \quad (3)$$

где $\frac{dN}{dt}$ – количество раствора, продиффундированного к реагирующей поверхности в единицу времени; D – коэффициент молекулярной диффузии; F – площадь фильтрации, м; d – толщина диффузного слоя, мм; C – концентрация раствора, моль/м³.

Так как скорость выщелачивания прямо пропорциональна температуре и обратно пропорциональна вязкости, а количество раствора численно равно коэффициенту фильтрации, расчет скорости массопереноса может быть произведен по формуле:

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{DFdC}{d}, \quad (4)$$

где $\frac{dC}{d\tau}$ – скорость выщелачивания – скорость массопереноса, м/с; D – коэффициент молекулярной диффузии; F – площадь фильтрации, м²; d – толщина диффузного слоя, мм; C – концентрация раствора, моль/м³ [3. С. 134–135].

Вышеприведенная модель позволяет произвести оптимизацию параметров режима выщелачивания исходя из специфики геолого-геофизических условий месторождения. При расчете принимается допущение, согласно которому при условиях выщелачивания на месторождении pH > 1, соответственно, образуется трисульфатный комплекс анионов уранила, константа которого равна 2500 [18, 19]. Площадь, охваченная диффузными процессами, принята за интервал растекания вниз, поскольку именно вертикальный массо-

перенос способствует риску вторичного рудогенеза в условиях значительной однородности и высокой проницаемости [20–22].

Предложенное нами оптимизационное решение предполагает снижение скорости диффузии за счет повышения вязкости раствора.

Табл. 1 отражает текущие и предлагаемые параметры режима выщелачивания.

Таблица 1. Сопоставление текущих и предлагаемых параметров режима выщелачивания для скважинного фонда месторождения Моинкум

Table 1. Comparison of current and proposed parameters of leaching mode for the boreholes of the Moinkum field

Наименование показателя Name of indicator	Значения/Values	
	Исходные Input	Рекомендуемые Recommended
Вязкость раствора, мПа*с Solution viscosity, mPa*s	19,7...21	21–23
Скорость фильтрации, м ³ /с Filtration velocity, m ³ /s	10,6...54,4	10,6...27,5
Концентрация раствора Solution concentration, %	1,5...1,7	1,7
Напорное давление, мПа Head pressure, MPa	193,9	185,5

Предложенные параметры вязкости, давления и скорости фильтрации направлены на снижение интенсивности диффузно-инфильтрационного массопереноса в нижележащие интервалы, что способствует повышению эффективности процесса выщелачивания в условиях дисперсного оруденения [21].

Разработанная модель оптимизации режима выщелачивания была использована для оптимизационных решений на скв. 1–4 технологического блока X месторождения Моинкум. При расчете оптимизированных параметров, наряду с ранее упомянутыми исходными условиями и допущениями, в учет также принимались такие характеристики, как глинистость, показатели проницаемости и пористости породы, характеристики раствора (табл. 2).

Таблица 2. Дополнительные показатели для расчета оптимизированного режима выщелачивания на опытных скв. 1–4

Table 2. Additional indicators for calculating the optimized leaching regime for pilot boreholes 1–4

Наименование показателя Name of indicator	Значение Value
Дебит раствора, м ³ /ч/Solution debit, m ³ /h	8,5...14,2
Проницаемость рудовмещающей породы, мкм Ore-bearing rock permeability, μm	0,1...0,5
Пористость/Porosity, %	26–28
Глинистость/Clay content, %	19,4...20
Плотность раствора, кг/м ³ /Solution density, kg/m ³	1007
Молярная концентрация раствора, моль/м ³ Solution molar concentration, mol/m ³	7000

На основании разработанной модели (уравнения (1)–(4)) были установлены оптимальные скорости диффузии на опытных скважинах месторождения (табл. 3).

Таблица 3. Оптимальные значения коэффициента внешней диффузии и скорости диффузного массопереноса

Table 3. Found values of the coefficient of external diffusion and the rate of diffuse mass transfer

№ скважины Borehole no	Коэффициент внешней диффузии, D External diffusion coefficient, D		Скорость диффузии, νD Diffusion velocity, νD	
	Исходное значение Input value	Значение, рассчитанное исходя из рекомендаций Value calculated according the recommendations	Исходное значение Input value	Значение, рассчитанное исходя из рекомендаций Value calculated according the recommendations
	1	$8,46^{(-10)}$	$7,72^{(-10)}$	$6,82^{(-17)}$
2	$3,309^{(-10)}$	$7,72^{(-10)}$	$2,67^{(-18)}$	$6,23^{(-17)}$
3	$9,014^{(-10)}$	$8,45^{(-10)}$	$8,52^{(-17)}$	$7,99^{(-17)}$
4	$9,01^{(-10)}$	$8,45^{(-10)}$	$7,27^{(-17)}$	$6,82^{(-17)}$

Вышеприведенные расчеты демонстрируют снижение скорости диффузии, что нивелирует скорость массопереноса на 8,6–10 %. Это позволяет снизить интенсивность техногенного рудогенеза, что препятствует увеличению площади вторичного оруденения на интервалах ниже границы закисления.

На графике (рис. 2) отражена зависимость изменения скорости массопереноса от скорости фильтрации и концентрации раствора по результатам апробации модели с учетом особенностей выбранных объектов скважинного фонда технологического блока X № 1–4.

Область оптимальных скоростей фильтрации, исходя из данных графика, находится в диапазоне 10–27 м³/сут, что коррелирует с рекомендуемыми значениями.

Далее представлена зависимость скорости массопереноса от вязкости технологического раствора в процессе выщелачивания в результате оптимизационного моделирования (рис. 3).

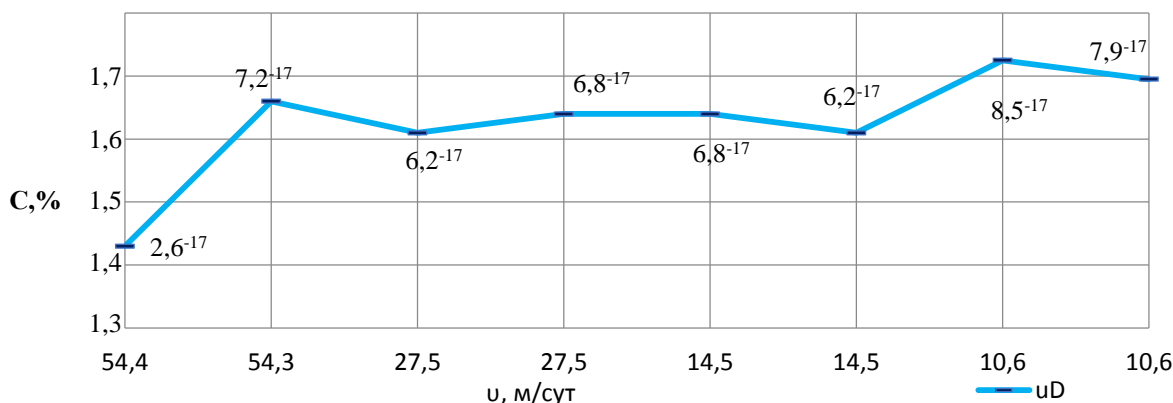


Рис. 2. Зависимость скорости массопереноса от скорости фильтрации и концентрации раствора

Fig. 2. Dependence of mass transfer rate on filtration rate and solution concentration

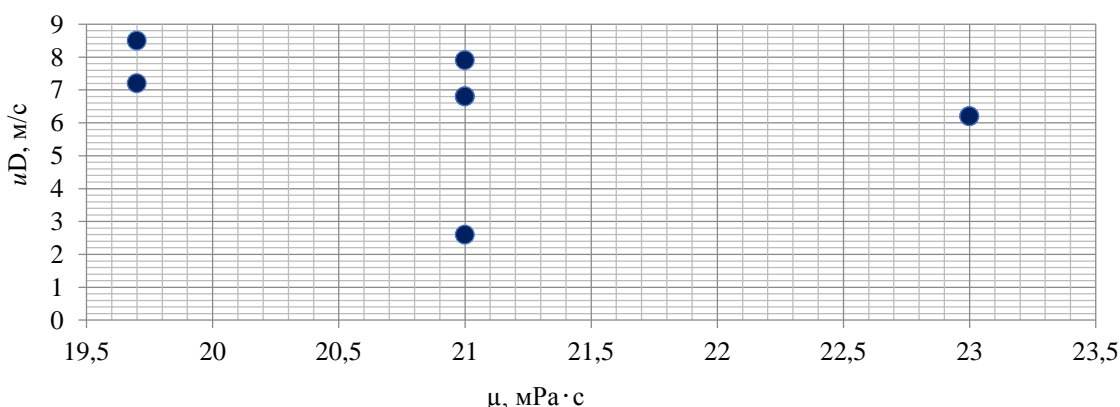


Рис. 3. Изменение скорости массопереноса в зависимости от динамической вязкости раствора на месторождении Моинкум

Fig. 3. Change in the rate of mass transfer depending on the dynamic viscosity of the solution at the Moinkum deposit

Область оптимальной вязкости по скв. 1–4 определяется диапазоном 19,5–21 мПа·с.

Результаты оптимизационного моделирования указывают на снижение скорости массопереноса по скважинам в среднем на 28 %. Некоторое сокращение скорости диффузного процесса обуславливает также повышение времени контакта руды с выщелачивающим

раствором и, соответственно, способствует увеличению извлекаемости на выходе с 58–63 до 61–68 %.

Полученные в ходе оптимизационного моделирования данные численно практически идентичны параметрам, предложенным для оптимизации режима выщелачивания, что подтверждает целесообразность предложенного метод.

Заключение

Предложенная модель оптимизации режима выщелачивания сформирована с учетом геолого-физической обстановки месторождения Моинкум, характеризующейся выдержанным песчаным репером. В условиях однородности и в целом высокой проницаемости рудовмещающих пород наибольший риск снижения продуктивности выщелачивания несет в себе процесс техногенного рудогенеза на нижележащих интервалах, который протекает достаточно интенсивно в связи с высокими скоростями фильтрации, используемыми в условиях дисперсного и бедного оруденения. Однако данное явление одновременно несет в себе и определенный потенциал для повышения добычи урана на месторождении при условии оптимизации процесса выщелачивания.

В сочетании с высокой в целом и однородной проницаемостью хорошо отсортированных песчаников высокие скорости создают благоприятные условия для непродуктивного массопереноса в нижележащие слои. Существенное повышение скорости фильтрации может привести к сокращению площади диффузии раствором и падению концентрации урана на дебете, либо вовсе сформировать невыщелаченные участки. Поэтому в данных условиях нами рекомендовано незначительное уменьшение скорости фильтрации в пределах оптимальных диапазонов в сочетании с увеличением вязкости раствора для снижения скорости диффузного массопереноса. Предложенная оптимизационная модель показала свою эффективность на объектах скважинного фонда месторождения Моинкум за счет возможности снизить скорости диффузного массопереноса в нижележащие слои и увеличить площадь охвата руды диффузными процессами, тем самым увеличив извлекаемость руды на 3–5 %.

Предложенная оптимизационная модель соизмерима с техническими и производственными возможностями, не требует существенных дополнительных затрат и не влечет усиления экологических и финансовых рисков, что крайне важно в современных реалиях отработки месторождений.

Тем не менее предложенная оптимизационная модель имеет и ограничения. В первую очередь, при не-

однородности рудовмещающих пород по фильтрационным свойствам, а также при морфолитологической сложности применение модели и предложенных оптимизационных решений неэффективно и технически трудноосуществимо [23]. Кроме того, ограничениями применения на месторождениях, удовлетворяющих критериям по однородности и выдержанности пород, служат выявленные особые условия:

- выраженные кольматационные процессы;
- высокая кавернозность;
- высокая карбонатность;
- глинистость свыше 40 %;
- присутствие петрохимических факторов осложненности.

При выявлении данных условий снижение скорости диффузного массопереноса и повышение вязкости раствора будет способствовать:

- усилению кольматационных процессов;
- перегрузке откачного оборудования;
- увеличению площади неотработанных пород [24].

Тем не менее оптимизационные решения могут быть использованы в качестве алгоритма для разработки и детализации подходов к интенсификации добычи урана на месторождениях, геолого-технологические условия которых отличны от объектов скважинного фонда месторождения Моинкум.

Предложенные оптимизационные решения не претендуют на всеохватывающий и инновационный характер, поскольку область их применения ограничена геолого-технологическими условиями добычи урана на гидрогенных месторождениях с высокопроницаемым песчаным репером. Результаты моделирования на опытных объектах месторождения Моинкум показали, что предложенный оптимизированный режим выщелачивания на основании регулирования скорости диффузного массопереноса эффективен на месторождениях с выдержанными и высокопроницаемыми рудовмещающими породами, предотвращает риски вторичного рудогенеза и повышает эффективность добычи урана за счет увеличения времени воздействия на рудоносную толщу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машковцев Г.А. Геолого-промышленные типы урановых месторождений стран СНГ. – М.: Изд-во ВИМС, 2008. – 72 с.
2. Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – 83 с.
3. Ушева Н.В. Математическое моделирование химико-технологических процессов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
4. Bassiouni Z. Geophysics and geosequestration. Part II. C. 11: Well Logging. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 14 p.
5. Прогноз литологического состава баженовской свиты на основе комплексной интерпретации геологических и геофизических материалов / М.А. Фомин, Е.А. Костырева, С.В. Рыжкова, Р.М. Саитов, И.С. Сотнич, В.Г. Эдер // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 154–167.
6. Технологический регламент проведения геофизических исследований. – Нур-Султан: АО «НАК Казатомпром», 2021. – 21 с.
7. Отчет по глубинному геологическому картированию мезозойско-кайнозойского чехла Чу-Сарысуйской депрессии. – Алматы: Волковгеология, 2012. – 160 с.
8. Данные по комплексному геофизическому исследованию скважинного фонда месторождения Моинкум. – Нур-Султан: АО НАК Казатомпром, 2019. – 76 с.
9. Сводный отчет по опробованию и испытанию керновых проб месторождении Моинкум. – Нур-Султан: Изд-во АО НАК Казатомпром, 2014. – 58 с.
10. Геологические колонки по скважинам в масштабе 1:500. – Нур-Султан: АО НАК Казатомпром, 2018. – 18 с.
11. Анализ параметра пористости с привлечением элементов региональной петрофизики (электрофации) и типа глинистости / И.Б. Ратников, Р.С. Шулга, Е.А. Романов, С.Н. Бастриков // Свойства горных пород. Геомеханика и геофизика. Горные науки и технологии. – 2016. – № 2. – С. 50–62
12. Increasing of filtration characteristics of ore bodies in borehole uranium mining / B. Rakishev, Zh. Kenzhetayev, A. Shampikova, B. Toktaruly // Materials of II International Conference Essays of Mining Science and Practice. EDP Sciences. 2020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800014> (дата обращения 02.07.2022).
13. Full-scale pore size distribution features of uranium-bearing sandstone in the northwest of Xinjiang, China / S. Zeng, H. Li, N. Zhang, B. Sun, J. Li, Y. Liu // Royal Society Publishing. –

2021. – № 5. – P. 2–14. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.202036> (дата обращения 01.07.2022).
14. Edwards C. Underground milling of high-grade uranium ore // Proceedings of an International Symposium Organized by the International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2009. – P. 151–160.
 15. Bai H. Geological characteristics and control mechanism of uranium enrichment in coal-bearing strata in the Yili Basin, Northwest China – implications for resource development and environmental protection // American Chemical Society: ACS Omega. – 2022. – № 7. – P. 5453–5479
 16. Fractal kinetic characteristics of hard-rock uranium leaching with sulfuric acid / S. Zeng, J. Li, K. Tan, S. Zhang // Royal Society Publishing. – 2018. – № 5. – P. 2–13. URL: <https://doi.org/10.1098/rsos.180403> (accessed 02.07.2022).
 17. Алибаева К.А. Численное исследование путей повышения выработки месторождения при добыче минералов методом подземного выщелачивания: дис. PhD. – Алматы, 2013. – 79 с.
 18. Sandstone-hosted uranium deposits as a possible source for critical elements: the Eureka mine case, Castell-Estado, Catalonia / M. Castillo-Oliver, J.C. Melgarejo, L. Torró, C. Villanova-de-Benavent, M. Campeny, Y. Diaz-Acha, S. Amores-Casals, J. Xu, J. Proenza, E. Tauler // Minerals. Mineral Geochemistry and Geochronology Mineral Deposits of Critical Elements. – 2020. – № 1. – P. 2–34.
 19. Дутова Е.М., Кузеванов К.И., Кузеванов К.К. Гидродинамическое обоснование изменений гидрогеохимических условий Стрежевского месторождения подземных вод (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 204–220.
 20. Подрезов Д.Р. Разработка и идентификация моделей оценки запасов рудника подземного скважинного выщелачивания урана: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2021. – 175 с.
 21. Characteristics of sandstone-type uranium mineralization in the Hangjinqi region of the northeastern Ordos Basin: clues from clay mineral studies / Q. Zhu, J. Li, G. Li, S. Wen, R. Yu, C. Tang, X. Feng, X. Liu // Ore Geology Reviews. – 2022. – № 11. – P. 215–277.
 22. Математическое моделирование пластовых систем: методическое указание/ под ред. М.М. Максимова. – Тюмень: Изд-во ОАО СургутНИПИнефть, 2016. – 211 с.
 23. Физика пласта / Т.Б. Кочина, В.Н. Спиридонова, Н.Н. Родионцев, И.А. Круглов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневартковского государственного университета, 2017. – 214 с.
 24. Борхович С.У., Пчелников И.В., Колесова С.Б. Подземная гидромеханика. – Ижевск: Изд-во Удмуртского Университета, 2017. – 176 с.

Поступила: 02.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 03.02.2023 г.

Информация об авторах

Бейсекеев Е.Ш., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; главный менеджер, АО «НАК Казатомпром».

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Воронцов П.Ю., аспирант кафедры геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Уральского государственного горного университета.

Дуйсебаева Т.С., докторант факультета химии и химической технологии Казахского Национального Университета имени Аль-Фараби.

UDC 622.775

OPTIMIZATION OF LEACHING MODE IN HYDROGENIC URANIUM DEPOSITS WITH HIGH PERMEABILITY SAND BENCHMARK

Yermek Sh. Beisekeyev^{1,2},
yermek_f-81@mail.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Pavel Yu. Vorontsov³,
pashen007@mail.ru

Tolkyn S. Duysebayeva⁴,
Tolkynsd@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² NAC Kazatomprom JSC,
17/12, Syganak street, Astana, 010000, Kazakhstan.

³ Ural State Mining University,
30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russia.

⁴ Kazakh National University named after Al-Farabi,
71, al-Farabi avenue, Almaty, 050000, Kazakhstan.

The relevance of the study is caused by the increase in the volume of uranium production at the deposits of the hydrogen type, the most common type on the territory of both the Republic of Kazakhstan. At the present stage there is a need to optimize the in-situ leaching to increase uranium ore extraction.

The goal of the research is to substantiate the possibility of optimizing the regulation of the in-situ leaching mode at uranium deposits with a mature sandy benchmark and high permeability by reducing the rate of diffuse mass transfer to increase recoverability and prevent secondary ore genesis.

Objects: boreholes logs and laboratory data of boreholes of block X of the Moinkum deposit of the Chu-Sarysu uranium ore province.

Methods: physical and mathematical modeling, induction logging, gamma ray logging, caliper logging, temperature logging, correlation and analysis of log data using Curve Editor, GIK. The hardware includes PIK-50, KSP-43 instruments, NS caliper, TEG electro thermometer, logging station, BSK interface and switching unit.

Results. Data of electric logging, gamma ray logging, and thermometry and caliper log data of the boreholes of block X of the Moinkum deposit, obtained by resistivity logging, intrinsic polarization potential logging and induction logging methods were correlated with subsequent analysis. The geological and technological conditions of ore extraction are revealed on the basis of the analysis. The features of mineralization and patterns of technogenic impact on the ore-bearing rock are analyzed. Optimization solutions were developed for intensification of ore extraction and control of secondary technogenic ore genesis based on the permeability factors of the rocks of the ore-bearing strata. The feasibility of controlling the diffusion rate in leaching by changing the thermo baric regime and the viscosity of the solution at the experimental boreholes of the Moinkum deposit of the Chu-Sarysu uranium ore province was proved. The paper introduces the method for calculating the optimal parameters of the leaching mode based on the characteristics of diffusion in rocks with different permeability.

Key words:

geophysical surveys, leaching mode, uranium mining by in-situ leaching, in-situ leaching, control of uranium mining, mining at hydrogenous deposits, uranium mining optimization.

REFERENCES

- Mashkovcev G.A. *Geologo-promyshlennye tipy uranovykh mestorozhdeniy stran SNG* [Geological and industrial types of uranium deposits of the CIS countries]. Moscow, VIMS Publ., 2008. 72 p.
- Noskov M.D. *Dobycha urana metodom skvazhinnogo podzemnogo vyshhelachivaniya* [Extraction of uranium by the method of borehole underground leaching]. Seversk, National Research Nuclear University MEPhI Publ., 2010. 83 p.
- Usheva N.V. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of chemical-technological processes]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2014. 135 p.
- Bassiouni Z. *Geophysics and geosequestration. Part II. C. 11: Well Logging*. Cambridge, Cambridge University Press, 2019. 14 p.
- Fomin M.A., Kostyreva E.A., Ryzhkova S.V., Saitov R.M., Sotnich I.S., Eder V.G. Prediction of the lithological composition of the Bazhenov Formation based on the integrated interpretation of geological and geophysical materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, no. 1, pp. 154–167. In Rus.
- Tekhnologicheskii reglament provedeniya geofizicheskikh issledovaniy* [Technological regulations for geophysical research]. Nur-Sultan, NAC Kazatomprom JSC Publ., 2021. 21 p.
- Otchet po glubinnomu geologicheskomu kartirovaniyu mezozoysko-kaynozoykogo chekhla Chu-Sarysuyskoy depressii* [Report on deep geological mapping of the Mesozoic-Cenozoic cover of the Chu-Sarysu depression]. Almaty, Volkovgeology Publ., 2012. 160 p.
- Dannye po kompleksnomu geofizicheskomu issledovaniyu skvazhinnogo fonda mestorozhdeniya Moinkum* [Data on a comprehensive geophysical survey of the borehole's stock of field]. Nur-Sultan, JSC NAC Kazatomprom Publ., 2019. 76 p.

9. *Svodnyy otchet po oprobovaniyu i ispytaniyu kernovykh prob mestorozhdeniya Moinkum* [Consolidated report on sampling and testing of core samples of Moinkum field]. Nur-Sultan, JSC NAC Kazatomprom Publ., 2014, 58 p.
10. *Geologicheskie kolonki po skvazhinam v masshtabe 1:200* [Geological columns for boreholes on a scale of 1:200]. Nur-Sultan, JSC NAC Kazatomprom Publ., 2018, 18 p.
11. Ratnikov I.B., Shulga R.S., Romanov E.A., Bastrikov S.N. Analysis of the porosity parameter with the involvement of elements of regional petrophysics (electrofacies) and clay type. *Properties of rocks. Geomechanics and geophysics. Mining sciences and technologies*, 2016, no. 2, pp. 50–62. In Rus.
12. Rakishhev B., Kenzhetayev Zh., Shampikova A., Toktaruly B. Increasing of filtration characteristics of ore bodies in borehole uranium mining. *Materials of II International Conference Essays of Mining Science and Practice. EDP Sciences*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800014> (accessed 2 July 2022).
13. Zeng S., Li H., Zhang N., Sun B., Li J., Liu Y. Full-scale pore size distribution features of uranium-bearing sandstone in the northwest of Xinjiang, China. *Royal Society Publishing*, 2021, no. 5, pp. 2–14. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.202036> (accessed 1 July 2022).
14. Edwards C. Underground milling of high-grade uranium ore. *Proceedings of an International Symposium Organized by the International Atomic Energy Agency*. Vienna, 2009, pp. 151–160.
15. Bai H. Geological characteristics and control mechanism of uranium enrichment in coal-bearing strata in the Yili Basin, Northwest China – implications for resource development and environmental protection. *American Chemical Society, ACS Omega*, 2022, no. 7, pp. 5453–5479.
16. Zeng S., Li J., Tan K., Zhang S. Fractal kinetic characteristics of hard-rock uranium leaching with sulfuric acid. *Royal Society Publishing*, 2018, no. 5, pp. 2–13. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsos.180403> (accessed 2 July 2022).
17. Alibaeva K.A. *Chislennoe issledovanie putey povysheniya vyrabotki mestorozhdeniya pri dobyche mineralov metodom podzemnogo vyshchelachivaniya*. PhD [Numerical study of ways to increase the production of a deposit during the extraction of minerals by the method of underground leaching. PhD]. Almaty, 2013, 79 p.
18. Castillo-Oliver M., Melgarejo J.C., Torró L., Villanova-de-Benavent C., Campeny M., Díaz-Acha Y., Amores-Casals S., Xu J., Proenza J., Tauler E. Sandstone-hosted uranium deposits as a possible source for critical elements: the Eureka mine case, Castell-Estaoó, Catalonia. *Minerals. Mineral Geochemistry and Geochronology Mineral Deposits of Critical Elements*, 2020, no. 1, pp. 2–34.
19. Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Kuzevanov K.K. Hydrodynamic substantiation of changes in the hydrogeochemical conditions of the Strezhevsky groundwater deposit (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 204–220. In Rus.
20. Podrezov D.R. *Razrabotka i identifikatsiya modeley otsenki zapasov rudnika podzemnogo skvazhinnogo vyshchelachivaniya urana*. Dis. Kand. nauk [Development and identification of models for assessing the reserves of a mine of underground borehole leaching of uranium. Cand. Diss.]. Moscow, 2021, 175 p.
21. Zhu Q., Li J., Li G., Wen S., Yu R., Tang C., Feng X., Liu X. Characteristics of sandstone-type uranium mineralization in the Hangjinqi region of the northeastern Ordos Basin: clues from clay mineral studies. *Ore Geology Reviews*, 2022, no. 11, pp. 215–277.
22. *Matematicheskoe modelirovanie plastovykh sistem* [Mathematical modeling of reservoir systems]. Tyumen, OJSC SurgutNIPIneft Publ., 2016, 211 p.
23. Kochina T.B., Spiridonova V.N., Rodiontsev N.N., Kruglov I.A. *Fizika plasta* [Reservoir physics]. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk State University Publ., 2017, 214 p.
24. Borkhovich S.U., Pchelnikov I.V., Kolesova S.B. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydromechanics]. Izhevsk, Udmurt University Publ., 2017, 176 p.

Received: 2 December 2022.

Reviewed: 3 February 2023.

Information about the authors

Yermek Sh. Beisekeyev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; manager, NAC Kazatomprom JSC.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Pavel Yu. Vorontsov, postgraduate student, Ural State Mining University.

Tolkyn S. Dusebayeva, doctoral student, Kazakh National University named after Al-Farabi.