

B. K. Mukhanov¹, Zh. Zh. Omirbekova¹, E. Zh. Orakbayev²

¹Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Kazakhstan,

²Kazakh National Research Technical University after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: zhanar_omirbekov@mail.ru, orakbaev_erbol@mail.ru

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF OPTIMAL PROCESS CONTROL SYSTEM OF UNDERGROUND LEACHING

Abstract. This article discusses the synthesis model of optimal process control in-situ leaching (ISL). The effectiveness of this method of mining is largely determined by the operational assessment of the basic parameters of the hydrodynamic condition of wells and reservoirs to modern take certain technological methods and management technology to eliminate the violation. In this connection the development of algorithmic support of relevant structural, parametric identification of the basic parameters of hydrodynamic processes PV and synthesis on the basis of this new and effective management systems. The task includes the problem of geo-technological field control synthesis on the basis of these models. The results of industrial tests and tested algorithms for the identification of the parameters of the control object. The main objectives of management geotechnological now is to increase the profitability of the field development, an increase in the proportion of uranium extracted from the productive horizon, and the reduction of pollution of groundwater. To solve this problem you need to be able to evaluate geochemical and hydrogeological state of the productive horizon and groundwater. In this study, to assess the PT parameters to develop an algorithmic, information and technical support for determining the characteristics of the data systems operating in the framework of the existing SCADA-systems, which allows the synthesis of an effective system of control over the processes PV.

Keywords: underground leaching, control system, software, mathematical models, uranium mining, optimal control model.

УДК 681.513.5

Б. К. Муханов¹, Ж. Ж. Омирбекова¹, Е. Ж. Оракбаев²

¹Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан,

²Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева,
Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается синтез модели оптимального управлению процессом подземного выщелачивания (ПВ). Эффективность работы этого способа добычи полезных ископаемых во многом определяется оперативной оценкой основных параметров гидродинамического состояния скважин и пластов, чтобы современно принимать те или иные технологические приемы и управление по устранению технологических нарушениях. В связи с этим актуальна разработка алгоритмического обеспечения по структурной, параметрической идентификации основных параметров гидродинамических процессов ПВ и синтез на этой основе новых эффективных систем управления. Задача охватывает проблему синтеза управления геотехнологического поля на основе полученных моделей. Приведены результаты промышленных испытаний и апробированы алгоритмы идентификации параметров объекта управления. Основными задачами управления геотехнологическим предприятием является повышение рентабельности разработки месторождения, увеличение доли урана, извлекаемого из продуктивного горизонта, и снижение загрязнения подземных вод. Для

решения этой задачи нужно уметь оценивать геохимическое и гидрогеологическое состояние продуктивного горизонта и подземных вод. В работе, для оценки параметров ПВ предлагается разработать алгоритмическое, информационное и техническое обеспечение системы по определения данных характеристик работающие в рамках существующих SCADA-систем, что позволяет синтезировать эффективную систему управления процессами ПВ.

Ключевые слова: подземное выщелачивания, система управления, программное обеспечение, математические модели, добыча урана, модели оптимального управления ПВ.

Введение. Геотехнологический способ добычи ископаемых является наиболее эффективным и активно используется в Казахстане. Этот способ характеризуется низкой себестоимостью, возможностью использования высокого уровня автоматизации, а также возможностью вовлечения в отработку месторождений со сложными горно-техническими и гидрогеологическими условиями, в том же числе со значительными глубинами залегания рудных тел в обводненных высоконапорных горизонтах и за балансовыми содержаниями металла в рудах.

В последнее десятилетие в Казахстане все более активно внедряется и используется геотехнологический способ добычи полезных ископаемых. Этот способ характеризуется низкой себестоимостью, невысокими капитальными затратами и их быстрой окупаемостью, комфортными условиями труда и высоким уровнем автоматизации процесса, а также возможностью вовлечения в отработку месторождений со сложными горно-техническими и гидрогеологическими условиями, в том числе со значительными глубинами залегания рудных тел в обводненных высоконапорных горизонтах и забалансовыми содержаниями металла в рудах. Эффективность работы во многом определяется своевременной определением (оценкой) параметров гидродинамического состояния скважин и пластов, что бы своевременно принимать те или иные технологические приемы и управлению по устранению технологических нарушений. Поэтому весьма актуальна разработка алгоритмического обеспечения по параметрической идентификации основных параметров гидродинамических процессов ПВ и разработка новых САУ на их основе.

Скважинное подземное выщелачивание (ПВ) является эффективным и экологически наиболее безопасным способом добычи урана. При подземном выщелачивании по системе скважин через продуктивный пласт прокачивается окислитель (раствор серной кислоты), который переводит соединения урана в растворимое состояние и позволяет производить его добычу путем откачки урансодержащих растворов. Эффективность добычи в значительной мере зависит от качества проработки рудовмещающего пласта раствором окислителя. Основная проблема, возникающая при реализации этого метода, заключается в том, что в настоящее время, как правило, не удастся получить достаточно достоверную информацию о строении рудного массива для того, чтобы регулировать технологический процесс с целью максимального извлечения полезного компонента и снижения себестоимости добычи. Закисление продуктивного горизонта и извлечение полезного компонента осуществляется неравномерно, преимущественно из наиболее проницаемых зон. Присутствие окислителя в породах гарантирует извлечение в этой области металла и наоборот. Слабопроницаемые участки не охвачены выщелачиванием и в них остаются неотработанные запасы. Недостаток информации проявляется, прежде всего, в том, что размеры этих зон и их положение в межскважинном пространстве достоверно неизвестны.

1. Характеристика объекта подземного выщелачивания как объекта управления. Методом подземного выщелачивания (ПВ) разрабатывают экзогенные месторождения урана, которые находятся в хорошо проницаемых подземных водоносных горизонтах. Извлечение урана из рудного тела происходит через систему технологических скважин. Через нагнетательные скважины в продуктивный горизонт нагнетается раствор веществ, способных растворять содержащие уран минералы. Образующийся в подземном водоносном горизонте продуктивный раствор извлекается через откачные скважины. Образующиеся после переработки продуктивных растворов маточные растворы до укрепляются выщелачивающими реагентами и снова подаются в нагнетательные скважины в качестве рабочих растворов. Основными задачами управления геотехнологическим предприятием является повышение рентабельности разработки месторождения, увеличение доли урана, извлекаемого из продуктивного горизонта, и снижение загрязнения подземных вод. Для решения этой задачи нужно уметь оценивать геохимическое и гидрогеологическое состояние продуктивного горизонта и подземных вод.

Рассмотрим процесс подземного выщелачивания (ПВ) как объект математического моделирования, с описанием структуры математической модели динамики процесса ПВ и принятых в ней ограничений и допущений.

Процесс подземного выщелачивания как объект управления относится к классу не стационарных, подвержено большому числу случайных возмущений топологически связанных объектов управления.

Управление таким объектом, возможно лишь с применением модели объекта в контуре управления. Существующая практика управления сводится к стабилизации расходных характеристик по закачным и откачным скважинам, то есть

$$Q_{отк} = \sum_{i=1}^6 k Q_{зак i} - \Delta \varepsilon, \quad (1.1)$$

где $Q_{отк}$ – расход продуктивного раствора; $Q_{зак i}$ – расход выщелачивающих растворов; k – доли расхода на закачную ячейку; $\Delta \varepsilon$ – потери расхода, $k = 1/2, 1/3, 1$.

Постановка задачи управления процессом подземного выщелачивания. В качестве критерия управления выбран показатель отражающий градиент давления в рудном теле от закачной до откачной скважины, запишем выражение для одной гексогональной ячейки

$$F = \sum_{i=1}^6 \frac{\Delta P_{pti}}{l_i} \rightarrow \max_{L, Q_{отк}} \quad (1.2)$$

$$W \frac{dL_i}{dt} = Q_{1i} - Q_{2i} \quad (1.3)$$

$$\Delta P_H = a_0 + a_1 Q_{отк} + a_2 Q_{отк}^2 \quad (1.4)$$

$$\Delta P_{pti} = r_{pti} \cdot Q_{2i} \quad (1.5)$$

$$\Delta P_{pti} = \rho g L_i - (P_1 - \Delta P_H - k P_{наб}) \quad (1.6)$$

$$P_{наб} = \rho g L_{наб} \quad (1.7)$$

$$Q_{отк} = \sum_{i=1}^6 Q_{ii} + \Delta \varepsilon \quad (1.8)$$

$$A \times \bar{Q} = \Phi \quad (1.9)$$

$$B \times \Delta \bar{P} = \Delta P_H \quad (1.10)$$

$$Q_{\min} < Q_{2i} < Q_{\max} \quad (1.11)$$

$$L < L_{\min} \quad (1.12)$$

где ΔP_{pti} – градиент давления в рудном теле (bar); l_i – расстояние от i -той закачной до откачной скважины (м); L_i – уровень выщелачивающего раствора в i -той закачной скважине (м); W – емкость закачной скважины (м^3); Q_{1i} – расход выщелачивающего раствора падающего в закачную скважину ($\text{м}^3/\text{ч}$); Q_{2i} – расход выщелачивающего раствора поступающий из закачной скважины в рудное тело через фильтр скважины ($\text{м}^3/\text{ч}$); ΔP_H – перепад давления создаваемый скважинным насосом (bar); a_0, a_1, a_2 – коэффициенты напорно-расходной характеристики скважинного насоса; r_{pti} – коэффициент сопротивления рудного тела в уравнении Дарси; P_1 – давление продуктивного раствора из откачной скважины (bar); $P_{наб}$ – напор создаваемый грунтовыми водами, определяется по уровню наблюдательной скважины; $\Delta \varepsilon$ – разница по расходам в скважинах; A – матрица инцидентности ветвей и вершин структурного графа гексогональной ячейки ПВ и технологических сетей трубопроводов (ТСТ); B – матрица независимых контуров структур графа ПВ и (ТСТ). Постановка задачи (1.2) – (1.12) сводиться к поиску таких уровней в закачных скважинах (L) и расходу в откачной скважине обеспечивающих max критерия (1.2) по ячейке.

Исследования модели оптимального управления ПВ на программном продукте Matlab. Модель задачи оптимального управлению процессом ПВ представленная выражениями (1.2) – (1.12) была набрана для исследования в среде Matlab. Схема модели для одной ячейки ПВ приведена на рисунках 1.1, 1.2.

Исследования на модели показаны на рис. 1.2 (для пары закачной скважины 14-1-1 и откачной 14-2-1).

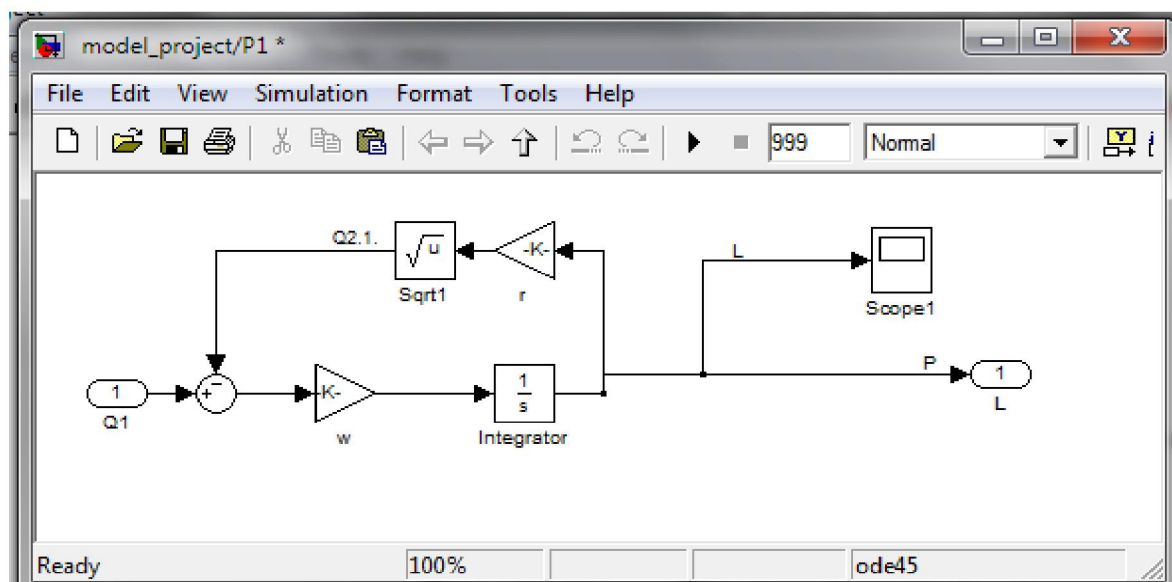


Рисунок 1.1 – Схема расчета уровня в закачной скважине

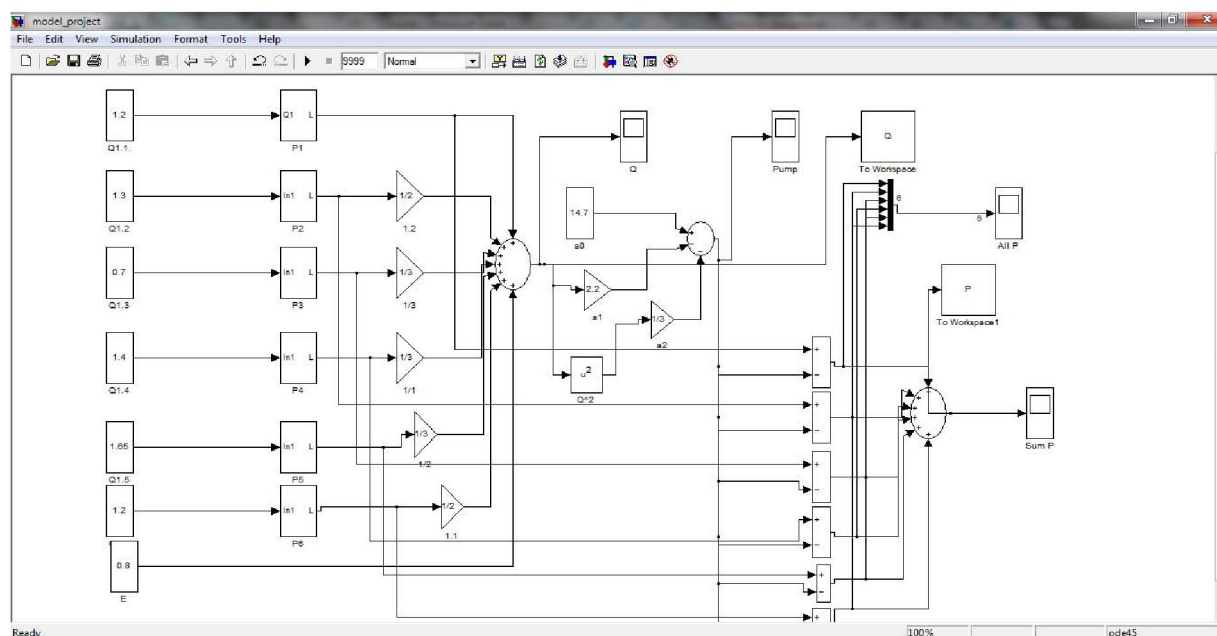


Рисунок 1.2 – Схема расчета критерия управления

2. Проведение испытаний системы управления в промышленных условиях рудник Акдала. По результатам промышленных испытаний были апробированы алгоритмы идентификации параметров объекта управления. В нашем случае была рассмотрена технологическая цепочка: закачная скважина, рудное тело, откачная скважина со скважинным насосом мощностью 7,5 кВт. Упрощенная технологическая схема имеет вид:

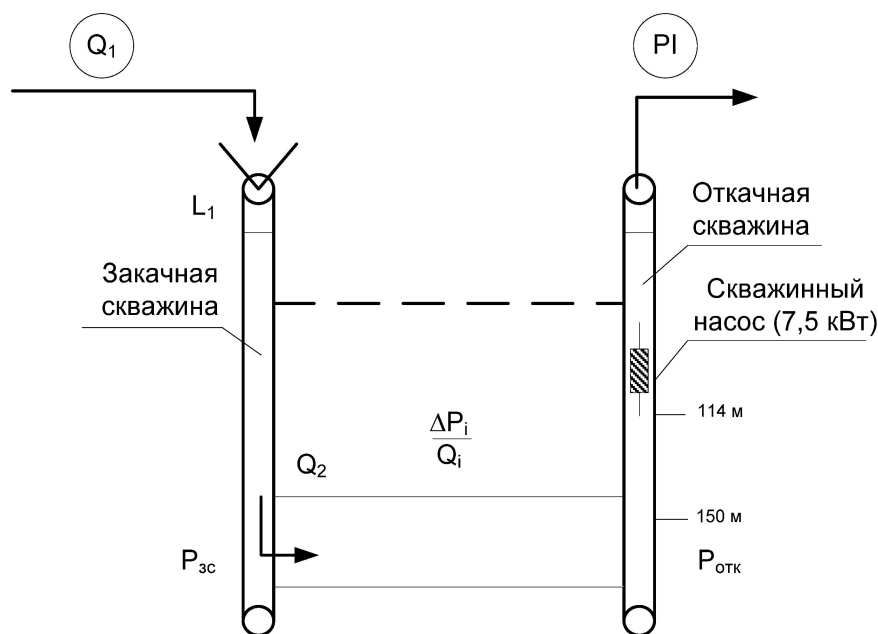


Рисунок 2.1 – Упрощенная технологическая схема ПВ

Для закачной скважины можно записать уравнение:

$$W \frac{dL}{dt} = Q_1 - Q_2,$$

$$P_{зс} = \rho g L, \quad (2.1)$$

где L – уровень выщелачивающего раствора в скважине (м); ρ – плотность выщелачивающего раствора (кг/м^3); g – $9,8 \text{ м/с}^2$; W – ёмкость закачной скважины (м).

Для измерения уровня использовались гидростатические уровнемеры.

Давление на рудное тело со стороны закачной скважины определяется по выражению $P_{зс} = \rho g L$, в нашем случае при $L=130 \text{ м} \Rightarrow 13 \text{ bar}$, если уровень будет падать на 80 м , то $L = 70 \text{ м} \Rightarrow P_{зс} = \rho g L \approx 7 \text{ bar}$.

Коэффициент фильтрации у фильтра закачной скважины будет равен

$$\Delta P = r Q^2 \quad \text{или} \quad r = \frac{\Delta P}{Q^2}; \quad (2.2)$$

при $Q = 1 \text{ м}^3/\text{час}$ или $0,27 \text{ л/с}$, $L = 130 \text{ м}$.

$\Delta P = 13 \text{ bar} - 7 \text{ bar} = 6 \text{ bar}$, где 7 bar давление грунтовых вод.

$$r = \frac{6 \text{ bar}}{0,27^2} = \frac{6 \text{ bar}}{0,729} = 82,3.$$

Для откачной скважины была идентифицирована расходно-напорная характеристика скважинного насоса и самой откачной скважины.

Расходно-напорная характеристика было определена по специальной методике, и имеет вид

$$H_{сн} = 12,8 + 0,03Q - 0,13Q^2, \quad (2.3)$$

где $H_{сн}$ – перепад создаваемый насосом (bar); Q – расход продуктивного раствора ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Расчет перепада давления на рудном теле поводится по следующей схеме:

$$\Delta P_{рт} = H_{сн} + P_{зс} - P_{отк} + P_I, \quad (2.4)$$

где $H_{сн}$ – перепад, создаваемый скважинным насосом (bar); $P_{зс}$ – давление, создаваемое столбом жидкости в закачной скважине (bar); $P_{отк}$ – давление, создаваемое столбом жидкости в откачной

скважине, при $L = 150$ м, примем $P_{oc} = 15$ (bar); P_I – показание манометра на выходе с откачной скважины (bar).

Как показали исследования на модели, для рассматриваемой ячейки зависимость перепада давления на рудном теле от расхода растворов имеет вид:

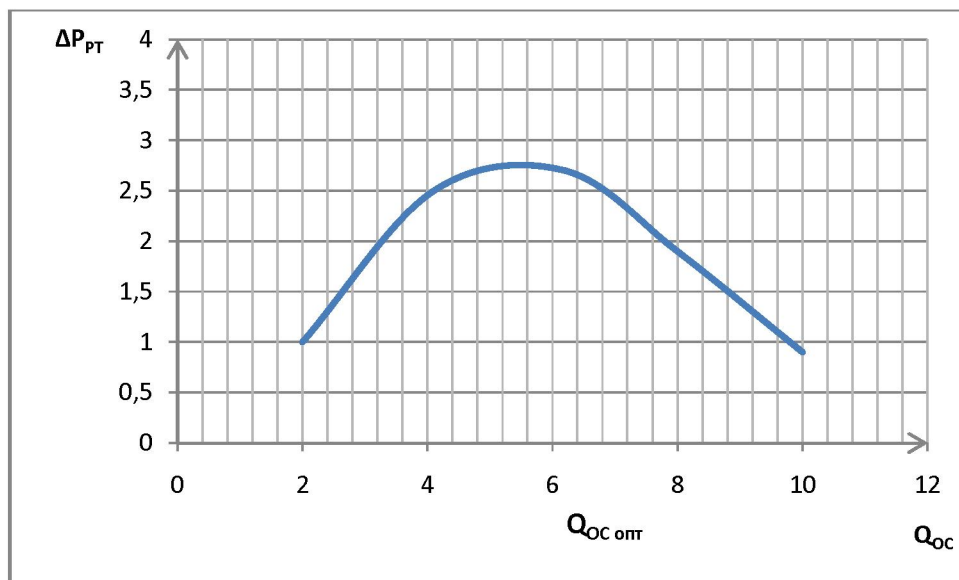


Рисунок 2.2 – Зависимость перепада $\Delta P_{рт}$ от расхода растворов

Исследования показывают, что для оптимального режима работы ячейки необходимо поддерживать уровень в закачной скважине $L = 60$ м, и расход продуктивного раствора в откачной скважине $6,2$ м³/ч. Что создает перепад давления на рудном теле $\Delta P_{рт} = 2,8$ bar, это максимальная возможный перепад при сопротивлении фильтра $r = 82,3$.

В настоящее время для определения гидродинамических характеристик скважин и пластов необходимо проводить специальные исследования скважин с применением глубинных приборов.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны технические средства по измерению уровня в закачных скважинах (см. рисунок 2.3). Подключен частотный преобразователь Prostar (см. рисунок 2.4) к скважинному насосу Grundfos.



Рисунок 2.3 – Датчик уровня для закачной скважины



Рисунок 2.4 – ЧПП “Prostar”

На рисунке 1.7 приведена реализация технических средств в виде шкафа управления.



Рисунок 2.5 – Шкаф управления включающий контроллеры Fatek, ОВЕН МЭ110 и модули МОХА беспроводной передачи данных.



Рисунок 2.6 – График экспериментального снижения уровня выпелачивающих растворов в закачной скважине и ее заполнения при увеличении расхода.

Вывод. Оценка основных параметров ПВ, такие как коэффициент фильтрации, уровень насыщенности пластов, расходно-напорные характеристики закачных и откачных скважин можно определить по изменениям технологических переменных на скважинах в процессе эксплуатации. При этом в качестве дополнительной информации используется топологические особенности соединения технологических трубопроводов, то есть в модели процесса ПВ используются сетевые модели, получаемые в соответствии с сетевыми законами Кирхгофа. Особенности этих моделей применяются при синтезе более эффективных систем управления процессом ПВ.

Поставленные цели исследования были выполнены, а разработанные алгоритмы идентификации и управления были проверены в промышленных условиях на руднике «Акдала».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мамиллов В.А., Петров Р., Шушания Г.Р. Добыча урана методом подземного выпелачивания. – М.: Атомиздат, 1980. – 248 с.
- [2] Uranium 2007: Resources, Production and Demand/Joint report by OECD NEA. – 2008. – № 6345. – 420 с.
- [3] Перспективы Ядерной Энергии. 2008: Резюме для Руководства. Основные Положения/OECD NEA. – 2008. – 29 с.
- [4] Каримов Х.К., Купченко В.П. О возможности природотехногенного рудоформирования на пластово-инфильтрационных месторождениях (урана) // Узбекский геологический журнал. – Ташкент, 1996. – № 3. – С. 101-105.
- [5] Каримов Х.К., Купченко В.П. Природно-техногенный рудогенез на ранее добытых залежах урановорудных месторождений учкудукского (песчаникового) типа. – Ташкент, 1996. – № 3. – С. 28-32.
- [6] Швидлер М.И. О решении типа источника в задаче нестационарной фильтрации в среде со случайной неоднородностью // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа. – М.: Недра, 1966. – № 4. – С. 57-64.
- [7] Швидлер М.И., Леви В.И. О статистических характеристиках дебитов фильтрационных потоков в неоднородных средах. – М.: Недра, 1966. – № 3. – С. 22-27.

- [8] Аликулов Ш.Ш. Совершенствование гидродинамического режима подземного выщелачивания урана с учетом кольматации руд: Автореф. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 87 с.
- [9] Истратов В.А., Колбенков А.В., Лях Е.В., Перекалин С.О. Радиоволновой метод мониторинга технологических процессов в межскважинном пространстве // Вестник краунц. науки о земле. – 2009. – № 2(14). – С. 59-63.
- [10] Колбенков А.В. Применение радиоволнового метода для контроля за разработкой урановых месторождений способом подземного выщелачивания: Автореф. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 215 с.
- [11] Ентов В.М. Теория фильтрация // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 57-59.
- [12] Bommer P.M., Schechter R.S. Mathematical modeling of in-situ uranium leaching // SPE Journal. – 1979. – № 19. – P. 34-45.
- [13] Schechter S., Bommer P.M. Optimization of uranium leach mining // SPE Journal. – 1982. – № 22. – P. 133-141.
- [14] Kabir M.I., Lake L.W., Schechter R.S. Evaluation of one-well uranium leaching test restoration // SPE Journal. – 1982. – № 22. – P.43-56
- [15] Кумеев С.С., Дорджиев А.Г., Сангаджиев М.М., Дорджиев А.А. Характеристика фильтрации жидкости в слабопроницаемых грунтах // Геология, география и глобальная энергия. – 2012. – № 4 (47). – С. 112-124.

REFERENCES

- [1] Mamilov V.A., Petrov R., Shushaniya G.R., Dobycha urana metodom podzemnogo vyshchelachivaniya.M.: Atomizdat, 1980.248 s (in Russ).
- [2] Uranium 2007.: Resources, Production and Demand/Joint report by OECD NEA. 2008. № 6345. 420 s (in Eng).
- [3] Perspektivy YAdemogi EHnergii 2008: Rezyume dlya Rukovodstva. Osnovnye Polozheniya/OECD NEA. 2008. 29 s (in Russ).
- [4] Karimov H.K., Kupchenko V.P. O vozmozhnosti prirodno tekhnogennoy rudogenez na plastovo-infil'tracionnyh mestorozhdeniyah (urana) Uzbekskiy geologicheskij zhurnal. Tashkent, 1996.№ 3.S.101-105 (in Russ).
- [5] Karimov H.K., Kupchenko V.P., Prirodno-tekhnogennyy rudogenez na ranee dobytyh zalezah uranovorudnyh mestorozhdenij uchkudukskogo (peschanikovogo) tipa. Tashkent, 1996. №3 . S. 28-32 (in Russ).
- [6] SHvidler M.I., O reshenii tipa istochnika v zadache nestacionarnoy fil'tracii v srede so sluchajnoj neodnorodnost'yu, Izv. AN SSSR, Mekhanika zhidkosti i gaza.M: Nedra 1966.-№4. S.57-64 (in Russ).
- [7] SHvidler M.I., Levi V.I., O statisticheskikh harakteristikah debitov fil'tracionnyh potokov v neodnorodnyh sredah. M: Nedra 1966. №3. S.22-27 (in Russ).
- [8] Alikulov Sh.Sh. Sovershenstvovanie gidrodinamicheskogo rezhima podzemnogo vyshchelachivaniya urana s uchetom kol'matatsii rud: avtoref....: kand. tekhn. nauk. M., 2011. 87 s (in Russ).
- [9] Istratov V.A., Kolbenkov A.V., Lyah E.V., Perekalin S.O. Radiovolnovoy metod monitoringa tekhnologicheskikh processov v mezhskvazhinnom prostranstve ,Vestnik kraunc. nauki o zemle. 2009. № 2(14). S. 59-63 (in Russ).
- [10] Kolbenkov A.V. Primenenie radiovolnovogo metoda dlya kontrolya za razrabotkoj uranovyh mestorozhdenij sposobom podzemnogo vyshchelachivaniya: avtoref....: kand. tekhn. nauk. M., 2010. 215 s (in Russ).
- [11] Entov V.M. Teoriya fil'traciya, Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal, 1998. №2. S. 57-59 (in Russ).
- [12] Vommer R.M., Schechter R.S. Mathematical modeling of in-situ uranium leaching, SPE Journal. 1979. № 19. P. 34-45 (in Eng).
- [13] Schechter S., Bommer P.M. Optimization of uranium leach mining, SPE Journal. 1982. №22. PP. 133-141 (in Eng).
- [14] Kabir M.I., Lake L.W., Schechter R.S. Evaluation of one-well uranium leaching test restoration , SPE Journal. 1982. № 22. P.43-56 (in Eng).
- [15] Kumeev S.S., Dordzhiev A.G., Sangadzhiev M.M., Dordzhiev A.A. Harakteristika fil'tracii zhidkosti v slabopronicaemyh gruntah, Geologiya, geografiya i global'naya ehnergiya. 2012. № 4 (47). C. 112-124 (in Eng).

Б. К. Муханов¹, Ж. Ж. Омирбекова¹, Е. Ж. Оракбаев²

¹ Алматы Энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

² Қ. И. Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

**ЖЕРАСТЫ ҰНҒЫМАЛЫ ШАЙМАЛАУ ҮРДІСІН ТИІМДІ БАСҚАРУ
ЖҮЙЕЛЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ҚҰРУ**

Аннотация. Мақалада гидродинамикалық параметрлердің анализі жүйенің басқарылуы негізінде сипатталған. Мақаланың тапсырмасы геотехнологиялық саласындағы уранды жерасты ұнғымалы шаймалау әдісі арқылы автоматты басқару процесі үшін әзірленген әдістері мен құралдарын бақылау мәселесін қамтиды.

Тірек сөздер: жерасты шаймалау, басқару жүйесі, бағдарламалық қамтамасыз ету, математикалық модельдер, уран өндіру, тиімді бақылау моделі.

Сведения об авторе:

Муханов Бахыт Каскабаевич – кандидат технических наук, Алматинский университет энергетики и связи, инженер НИС, доцент кафедры Инженерная кибернетика. E-mail: bmukhanov@verbulak.com.

Омирбекова Жанар Жумахановна – доктор PhD, Алматинский университет энергетики и связи, инженер НИС, доктор PhD кафедры Инженерная кибернетика. E-mail: zhanar_omirbekov@mail.ru.

Оракбаев Ербол Жумагельдиевич – магистр, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сәтбаева, г. Алматы. Докторант, “Автоматизации и управление”. E-mail: orakbaev_erbol@mail.ru