

ISSN 2518-170X (Online),
ISSN 2224-5278 (Print)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ГЕОЛОГИЯ ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
СЕРИЯСЫ



СЕРИЯ
ГЕОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



SERIES
OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

1 (421)

ҚАҢТАР – АҚПАН 2017 ж.
ЯНВАРЬ – ФЕВРАЛЬ 2017 г.
JANUARY – FEBRUARY 2017

ЖУРНАЛ 1940 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1940 г.
THE JOURNAL WAS FOUNDED IN 1940.

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА
АЛМАТЫ, НАН РК
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р ы

э. ғ. д., профессор, ҚР ҰҒА корреспондент-мүшесі

И.К. Бейсембетов

Бас редакторының орынбасары

Жолтаев Г.Ж. проф., геол.-мин. ғ. докторы

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

Абаканов Т.Д. проф. (Қазақстан)
Абишева З.С. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Алиев Т. проф., академик (Әзірбайжан)
Бакиров А.Б. проф., (Қырғыстан)
Беспәев Х.А. проф. (Қазақстан)
Бишимбаев В.К. проф., академик (Қазақстан)
Буктуков Н.С. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Бұлат А.Ф. проф., академик (Украина)
Ганиев И.Н. проф., академик (Тәжікстан)
Грэвис Р.М. проф. (АҚШ)
Ерғалиев Г.Х. проф., академик (Қазақстан)
Жуков Н.М. проф. (Қазақстан)
Кенжалиев Б.К. проф. (Қазақстан)
Қожахметов С.М. проф., академик (Қазақстан)
Конторович А.Э. проф., академик (Ресей)
Курскеев А.К. проф., академик (Қазақстан)
Курчавов А.М. проф., (Ресей)
Медеу А.Р. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Мұхамеджанов М.А. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Нигматова С.А. проф. (Қазақстан)
Оздоев С.М. проф., академик (Қазақстан)
Постолатий В. проф., академик (Молдова)
Ракишев Б.Р. проф., академик (Қазақстан)
Сейтов Н.С. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Сейтмуратова Э.Ю. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Степанец В.Г. проф., (Германия)
Хамфери Дж.Д. проф. (АҚШ)
Штейнер М. проф. (Германия)

«ҚР ҰҒА Хабарлары. Геология мен техникалық ғылымдар сериясы».

ISSN 2518-170X (Online),

ISSN 2224-5278 (Print)

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ (Алматы қ.).

Қазақстан республикасының Мәдениет пен ақпарат министрлігінің Ақпарат және мұрағат комитетінде 30.04.2010 ж. берілген №10892-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік.

Мерзімділігі: жылына 6 рет.

Тиражы: 300 дана.

Редакцияның мекенжайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18, <http://nauka-nanrk.kz/geology-technical.kz>

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2017

Редакцияның Қазақстан, 050010, Алматы қ., Қабанбай батыра көш., 69а.

мекенжайы: Қ. И. Сәтбаев атындағы геология ғылымдар институты, 334 бөлме. Тел.: 291-59-38.

Типографияның мекенжайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Г л а в н ы й р е д а к т о р

д. э. н., профессор, член-корреспондент НАН РК

И. К. Бейсембетов

Заместитель главного редактора

Жолтаев Г.Ж. проф., доктор геол.-мин. наук

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

Абаканов Т.Д. проф. (Казахстан)
Абишева З.С. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Алиев Т. проф., академик (Азербайджан)
Бакиров А.Б. проф., (Кыргызстан)
Беспаяев Х.А. проф. (Казахстан)
Бишимбаев В.К. проф., академик (Казахстан)
Буктуков Н.С. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Булат А.Ф. проф., академик (Украина)
Ганиев И.Н. проф., академик (Таджикистан)
Грэвис Р.М. проф. (США)
Ергалиев Г.Х. проф., академик (Казахстан)
Жуков Н.М. проф. (Казахстан)
Кенжалиев Б.К. проф. (Казахстан)
Кожаметов С.М. проф., академик (Казахстан)
Конторович А.Э. проф., академик (Россия)
Курскеев А.К. проф., академик (Казахстан)
Курчавов А.М. проф., (Россия)
Медеу А.Р. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Мухамеджанов М.А. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Нигматова С.А. проф. (Казахстан)
Оздоев С.М. проф., академик (Казахстан)
Постолатий В. проф., академик (Молдова)
Ракишев Б.Р. проф., академик (Казахстан)
Сейтов Н.С. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Сейтмуратова Э.Ю. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Степанец В.Г. проф., (Германия)
Хамфери Дж.Д. проф. (США)
Штейнер М. проф. (Германия)

«Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук».

ISSN 2518-170X (Online),

ISSN 2224-5278 (Print)

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №10892-Ж, выданное 30.04.2010 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 300 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

<http://наука-нанрк.kz/geology-technical.kz>

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2017

Адрес редакции: Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69а.

Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева, комната 334. Тел.: 291-59-38.

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

E d i t o r i n c h i e f

doctor of Economics, professor, corresponding member of NAS RK

I. K. Beisembetov

Deputy editor in chief

Zholtayev G.Zh. prof., dr. geol-min. sc.

E d i t o r i a l b o a r d:

Abakanov T.D. prof. (Kazakhstan)
Abisheva Z.S. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Aliyev T. prof., academician (Azerbaijan)
Bakirov A.B. prof., (Kyrgyzstan)
Bespayev Kh.A. prof. (Kazakhstan)
Bishimbayev V.K. prof., academician (Kazakhstan)
Buktukov N.S. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Bulat A.F. prof., academician (Ukraine)
Ganiyev I.N. prof., academician (Tadjikistan)
Gravis R.M. prof. (USA)
Yergaliev G.Kh. prof., academician (Kazakhstan)
Zhukov N.M. prof. (Kazakhstan)
Kenzhaliyev B.K. prof. (Kazakhstan)
Kozhakhmetov S.M. prof., academician (Kazakhstan)
Kontorovich A.Ye. prof., academician (Russia)
Kurskeyev A.K. prof., academician (Kazakhstan)
Kurchavov A.M. prof., (Russia)
Medeu A.R. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Muhamedzhanov M.A. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Nigmatova S.A. prof. (Kazakhstan)
Ozdoyev S.M. prof., academician (Kazakhstan)
Postolatii V. prof., academician (Moldova)
Rakishev B.R. prof., academician (Kazakhstan)
Seitov N.S. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Seitmuratova Ye.U. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Stepanets V.G. prof., (Germany)
Humphery G.D. prof. (USA)
Steiner M. prof. (Germany)

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences.

ISSN 2518-170X (Online),

ISSN 2224-5278 (Print)

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 10892-Ж, issued 30.04.2010

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,
<http://nauka-nanrk.kz/geology-technical.kz>

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2017

Editorial address: Institute of Geological Sciences named after K.I. Satpayev
69a, Kabanbai batyr str., of. 334, Almaty, 050010, Kazakhstan, tel.: 291-59-38.

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 1, Number 421 (2017), 205 – 216

B. K. Mukhanov¹, W. Wójcik², Zh. Zh. Omirbekova¹, Y. Zh. Orakbayev³

¹Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Kazakhstan,

²Lublin University of Technology, Poland,

³K. I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: zhanar_omirbekov@mail.ru; waldemar.wojcik@pollub.pl; orakbaev_erbol@mail.ru

**STUDY OF IN-SITU LEACHING OF METALS
BY NUMERICAL SIMULATION**

Abstract. The article is devoted to numerical modeling of uranium in-situ leaching process, which enables to assess the dynamics of the technological process. Efficient simulation of in-situ leaching is an urgent task, demanded by many enterprises of the mining industry worldwide. Mathematical modeling, given in the article, describes the dynamics of in-situ leaching. It should be borne in mind that in-situ leaching has characteristics, in connection with which its use becomes specific, it requires some knowledge and tools for analysis and management process. Designed to be a conceptual model allows to take into account all the information about the geological environment, the geometrical properties of hydraulic parameters of solid state properties, including homogeneous and isotropic, fluid properties, boundary conditions.

Keywords: in-situ leaching, conceptual model, numerical modeling, mathematical modeling, Darcy law, visualization.

УДК 681.513.5

Б. К. Муханов¹, W. Wójcik², Ж. Ж. Омирбекова¹, Е. Ж. Оракбаев³

¹Алматинский университет энергетики и связи, Казахстан,

²Люблинский технический университет, Польша,

³Казахский национальный исследовательский технический университет, Алматы, Казахстан

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЗЕМНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ
С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Аннотация. Статья посвящена численному моделированию процессов подземного выщелачивания урана, которое позволяет оценивать динамику технологического процесса. Эффективное моделирование процесса подземного выщелачивания является актуальной задачей, востребованной многими предприятиями горнодобывающей отрасли во всем мире. Математическое моделирование, приведенное в статье, описывает динамику подземного выщелачивания. При этом необходимо учитывать, что подземное выщелачивание имеет характерные особенности, в связи с чем его применение становится специфичным, требует определенных знаний и инструментов для анализа и управления процессом. Разработанная в статье концептуальная модель позволяет, учитывает всю информацию о геологической обстановке, геометрических свойств, гидравлических параметров, твердофазных свойств, в том числе однородности и изотропности, свойств жидкости, граничного условия.

Ключевые слова: подземное выщелачивания, концептуальная модель, численное моделирования, математическое моделирования, закон Дарси, визуализация.

Введение. Все больше внимания уделяются вопросам моделирования процессом подземного выщелачивания, с целью решения задач является поднятия эффективности рассматриваемого процесса.

Особенность процесса подземного выщелачивания (ПВ) определяется процессом фильтрации жидкости в грунте. Проницаемость руд и вмещающих пород является одним из важнейших условий движения выщелачивающих растворов, поэтому при моделировании процессов ПВ, изучение фильтрационных свойств является одной из главных задач.

Количественно проницаемость руд и вмещающих пород выражается коэффициентом фильтрации или коэффициентом водопроницаемости, который численно равен скорости фильтрации вод через породу при напорном градиенте, равном единице, и измеряется в единицах м/сутки (или см/с). Огромное значение имеет фильтрационная неоднородность руд и рудовмещающих пород, которая определяет конвективную дисперсию и распространение растворов, а также контролирует массоперенос в продуктивных пластах.

Разработка численной модели можно охарактеризовать как представление концептуальной модели естественной системы с использованием численных алгоритмов подземного выщелачивания и взаимодействие грунтовых вод.

Численные модели используются для моделирования возмущения системы, чтобы оценить на более сложные реальные системы

Используя основные законы физики и химии, которые регулируют поток грунтовых вод, а также растворенного вещества необходимо разработать математически представленную концептуальную модель. Концептуальная модель учитывает всю информацию о геологической обстановке, геометрических свойств, гидравлических параметров, твердофазных свойств, в том числе однородности и изотропности, свойств жидкости, граничного условия, как источников и поглотителей жидкостей, растворенных веществ, а также их пространственных, зависящих от времени распределений в пределах исследуемого района и ее границы. Целью численной модели является решение дифференциального уравнения в стационарных условиях для невозмущенной системы и позволяет моделировать поведение процесса в течение долгого времени.

Определение конкретных целей модели.

- Разработка концептуальной модели подземного выщелачивания, который включает в себя всю доступную информацию о гидродинамических и геохимических данных на физических и химических свойств системы, которые являются актуальными для явного описания системы. Это свойства, которые описывают движение подземных вод и растворов и массопереноса.

- Построение математической модели, где все понятия от концептуальной модели выражаются в математических уравнениях. Предположения о граничных условий и других свойств концептуальной модели включены здесь.

- Разработка численной модели (1) Дискретизация области создания числовой сетки или сетки из области, чтобы смоделировать, или использовать другие методы дискретизации, как, например, методы бессеточные;

- (2) Дискретизация математических уравнений математической модели (если написать свою собственную компьютерную программу моделирования), или выбрать компьютерную программу, которая может решить математические уравнения математической модели. Компьютерная программа должна быть проверена против известными аналитическими решениями или ранее решенных задач, чтобы определить, является ли компьютерный код правильно и функционирует должным образом. Вклад в программе являются присвоенные значения гидравлических параметров, жидкости и свойств материала и т.д., каждый элемент или элемент; (3) Назначение граничных условий к сетке или сетке (внешние и внутренние).

- Калибровка численной модели, где значения числовых или физических параметров моделирования в вычислительной модели оптимизированы таким образом, что хорошее соответствие между моделируемых и измеренных данных поля достигается, и полученные результаты правдоподобным. Калибровка модели производится с использованием полевых данных, собранных в прошлом, и по сравнению с численными результатами.

- Проверка численной модели используется для определения степени, в которой модель является точным представлением реального мира с точки зрения предполагаемого использования модели. Это осуществляется с использованием полевых данных, которые еще не были использованы для калибровки модели.

• После калибровки и проверки, анализ чувствительности делается, чтобы определить наиболее важные параметры, влияющие на поведение системы. Если неопределенность модели низка (сравнение численных результатов с экспериментальными данными), численная модель, можно считать подходящим для выполнения численного моделирования в соответствии с конкретными задачами, для которых она была разработана (например, делать прогнозы).

В данной статье рассмотрены шаги создания модели представлены шаги создания модели (см. рисунок 1).

Procedure of a numerical model elaboration

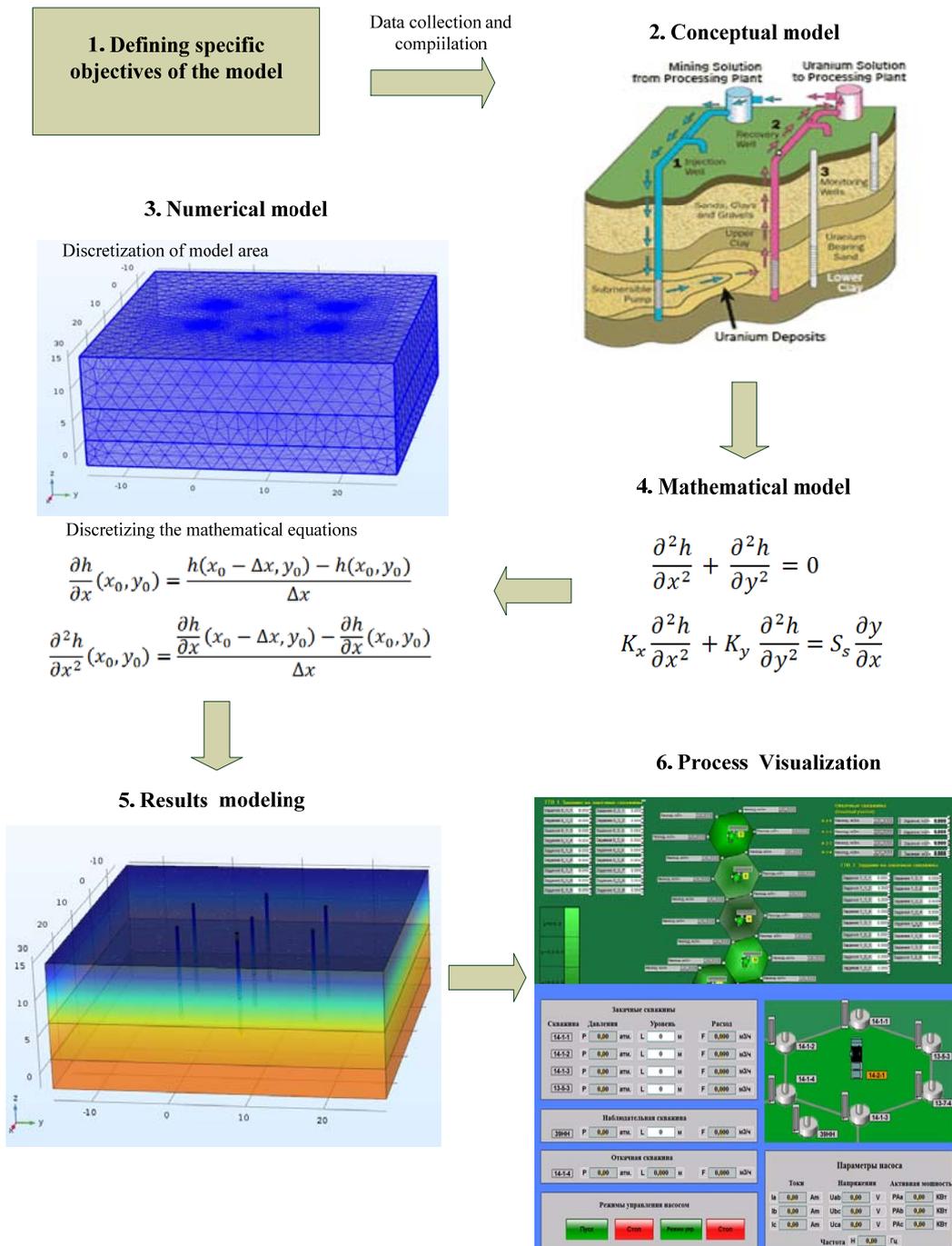


Рисунок 1 – Этапы создания модели

Figure 1 – Stages of creating a model

1. Определение целей численной модели. Численные модели используются для выполнения моделирования для восстановления процессов, имевших место в прошлом, и прогнозировать процессы подповерхностных сложных систем, такие как подземное выщелачивания или движение раствора в пористых средах, в которых многочисленные соединенные процессы с взаимодействующими параметрами и функциями параметров движения подземных пород и вод, а также переноса растворенных веществ и растворов.

2. Концептуальная модель. Прежде чем выбрать коммерческое программное обеспечение или построения пользовательского встроенного кода для создания цифровой модели, концептуальная модель предметной области должна быть создана. Концептуальная модель является нашей идеализацией гидрогеологической системы описанного с помощью математического и численного модели. Это виртуальное представление геологической системы, опираясь на картах, сечений и существующих баз данных, таких как физические и химические свойства, позволяет явное описание наиболее важных свойств, которые управляют потоком раствора и растворенных веществ. Концептуальная модель включает допущения в отношении (1), регулирующих процессы, связанные с подземными водами, растворенного вещества, (2) транспорта на границах области, (3) размерностью, (4) гидро-стратиграфии, (5) поток направленности, (6) свойства материала, и (7) модели гетерогенности. Другими словами, концептуальная модель представляет собой упрощенное и систематизированное представление высокого уровня области, содержащего набор предположений. Эта модель представляет собой наилучшее понимание процессов, которые естественным образом возникают в подземном выщелачивания.

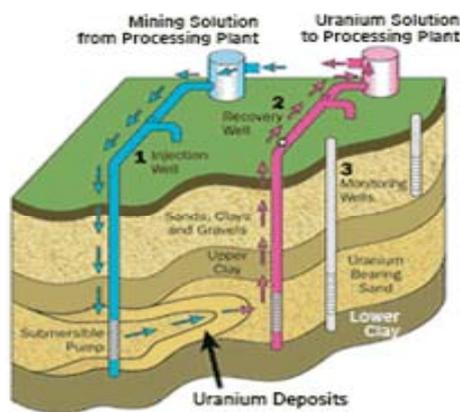


Рисунок 2 – Концептуальная модель

Figure 2 – Conceptual model

Методом подземного выщелачивания разрабатывают экзогенные месторождения урана, которые находятся в хорошо проницаемых подземных водоносных горизонтах. Извлечение урана из рудного тела происходит через систему технологических скважин (рисунок 2). Через нагнетательные скважины (1) в продуктивный горизонт нагнетается поступает раствор веществ, способных растворять содержащие уран минералы. Образующийся в подземном водоносном горизонте продуктивный раствор извлекается через откачные скважины (2). 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.

Вокруг каждой зоны оруденения пробуривается группа наблюдательных скважин (3) для отслеживания движения растворов за пределы района разработки. Скважины обсаживаются, чтобы жидкости текли только в рудную зону и из нее, не затрагивая вышележащих водоносных горизонтов.

3. Построение математической модели. После приобретения информации и полевых данных о системе водоносного горизонта создается концептуальная модель, в котором были определены и выражены их основные уравнения соответствующие транспортные процессы, происходящие в недрах. Далее, оценка выбора программ для моделирования процесса. Оценка пригодности каждой индивидуальной программы в соответствии с имеющимися данными полевых и задач по моделированию необходимо до выбора окончательной программы.

Основными целями моделирования являются:

- для оценки параметры потока подземных жидкостей с помощью сравнения численных результатов с данными измерения эксперимента
- для предсказания тенденции потока.

Математическая постановка задачи. Математическая модель однофазного течения в пористой среде описывается уравнением неразрывности

$$\frac{\partial mp}{\partial t} + \operatorname{div} pu = f(x, t) \quad (1)$$

и законом Дарси

$$u = -k\mu(\operatorname{grad} p + \rho g), \quad (2)$$

здесь p – давление, u – скорость фильтрации флюида в пористой среде, k – проницаемость пористой среды, μ – вязкость флюида, g – вектор ускорения свободного падения и f – плотность внутренних источников/стоков.

Подставляя закон Дарси (2) в уравнение неразрывности (1), учитывая слабую сжимаемость флюида, упругую деформируемость коллектора и пренебрегая действием гравитационных сил ввиду незначительной мощности нефтяных месторождений [7–9] (толщина пласта на 2–3 порядка меньше характерных размеров пласта в горизонтальной плоскости), получаем следующее уравнение для давления:

$$\beta \frac{\partial p}{\partial t} - \operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p \right) = f(x, t), \quad (3)$$

где β – коэффициент совместной упругоэластичности флюида и коллектора.

В вычислительной практике решения задач фильтрации правую часть $f(x, t)$ можно задать в виде суммы мощностей источников/стоков

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p \right) = \sum_{i=1}^{N_q} q_i(t) \psi_i(x), \quad x \in \Omega, t \in (0, T], \quad (4)$$

где q_i для двумерного случая, когда задаем точечный источник/сток, – дебит i -й скважины, а в случае горизонтальной скважины – приток флюида, приходящийся на единицу поверхности ствола i -й скважины, $\psi_i(x)$ – неотрицательные весовые функции, N_q – количество скважин, $T > 0$ и $\Omega \in \mathbb{R}^\alpha$, $\alpha = 2, 3$.

Уравнение (4) дополняется соответствующими граничными и начальными условиями

$$-\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad x \in \Gamma, t \in (0, T], \quad (5)$$

$$p(x, 0) = p_0(x), \quad x \in \Omega, \quad (6)$$

где Γ – граница Ω , n – внешняя нормаль к Γ .

Таким образом, требуется найти функцию $p(x, t)$, $t \in (0, T]$, $T > 0$, удовлетворяющую параболическому уравнению, граничным и начальным условиям (5), (6) при заданных входных данных $k, \mu, c, p_0, q_i(t), \psi_i(x), i = 1, 2, \dots, N_q$. Начально-краевая задача (4)–(6) относится к классу прямых задач.

4. Численная постановка концептуальной модели. После того, как концептуальная модель построена, вся информация, содержащаяся в нем должна быть преобразована в набор математических выражений, выражающей массу, растворенных веществ и энергетического баланса и потока уравнений (в том числе соответствующих граничных условий). Затем численная модель строится путем дискретизации этих математических уравнений в пространстве, используя объемный подход управления, так и во времени. Полученные матрицы дискретных численных уравнений

и массивов входных данных с граничными и начальными условиями затем используются для численного моделирования ответов на реальной системе. Значения входных переменных могут быть изменены, чтобы произвести различные сценарии моделирования.

Подход управления данными использует сетку, т.е. поле дискретных ячеек, который охватывает модель предметной области в одном, двух или трех измерениях. Для контрольного объема каждого элемента индивидуальное усреднение (или интерполяции) потока, транспорта и термодинамических свойств или переменных выполняется. Подход управления объемом включает в себя следующие широко используемые схемы дискретизации: обычный метод конечных разностей, различные методы конечных элементов, например, классические методы конечных элементов Галеркина, а также граничного элемента и методы бессеточные, которые были разработаны в последнее время и используются для моделирования ПВ.

5. Моделирование в среде comsol multiphysics. Для решения PDE, COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов (FEM). Программное обеспечение запускает конечноэлементный анализ вместе с сеткой учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Так как многие физические законы выражаются в форме PDE, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики таких как: химические реакции, диффузия, гидродинамика, фильтрация и т.д.

Кроме вышперечисленного, программа позволяет с помощью переменных связи (coupling variables) соединять модели в разных геометриях и связывать между собой модели разных размерностей.

Comsol Multiphysics используется для численного моделирования распределения потока для аналитического решения, а также использование различных режимов для моделирования эксперимента. В качестве отправной точки используется граничные и начальные условия.

Схематическое представление профиля гексагональной ячейки формы выщелачивания приведено на рисунке 3.

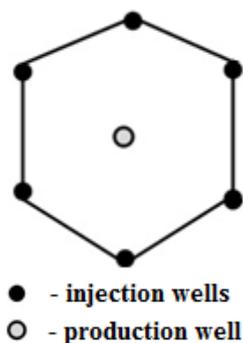


Рисунок 3 – Схематическое представление гексагональных ПВ

Figure 3 – Schematic representation of the hexagonal UL

Процесс численного моделирования составляет из несколько шагов:

- Выбор физического закона для моделирования процесса;
- Выбор методов решения дифференциального уравнения в частных производных;
- Выполнить построение геометрии;
- Получение результатов исследования.

1. *Выбор физики.* В качестве выбранного физического закона является эмпирический закон Дарси (2) в пористой среде неизотермических жидкостей для определения гидравлического напора.

2. *Метод PDE.* Для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных выбран метод произвольного вычисления Лагранж-Эйлера, чтобы вычислить изменение потока подземных жидкостей в пространстве и во времени с заданными начальными и граничными условиями.

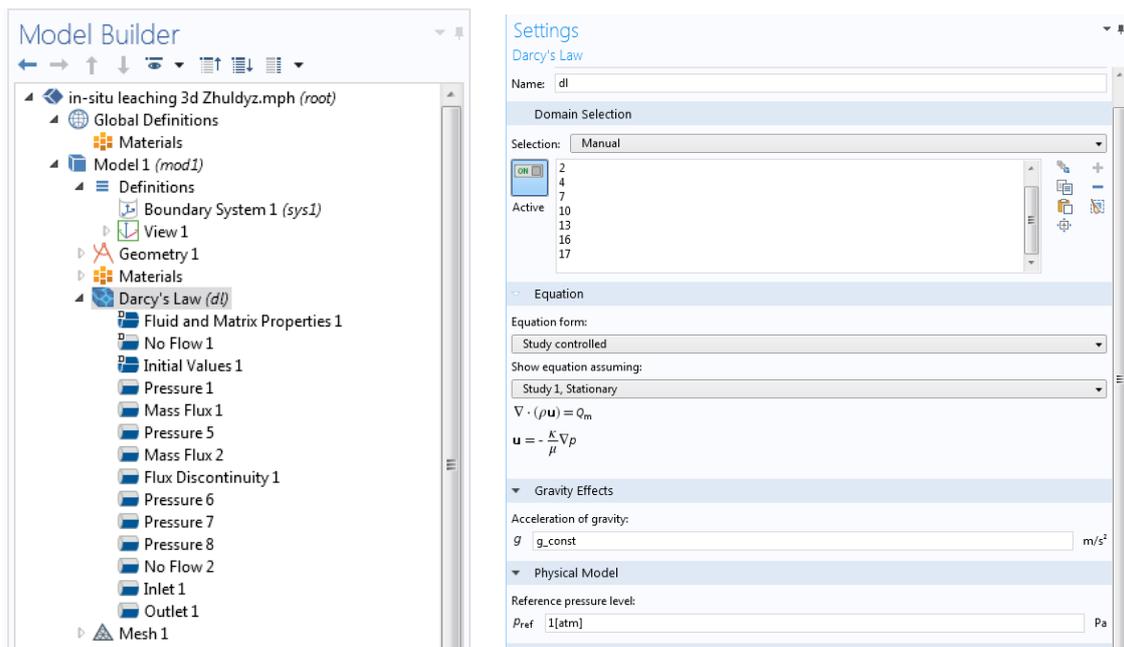


Рисунок 4 – Выбор физического закона для моделирования

Figure 4 – Selecting the physical law for modeling

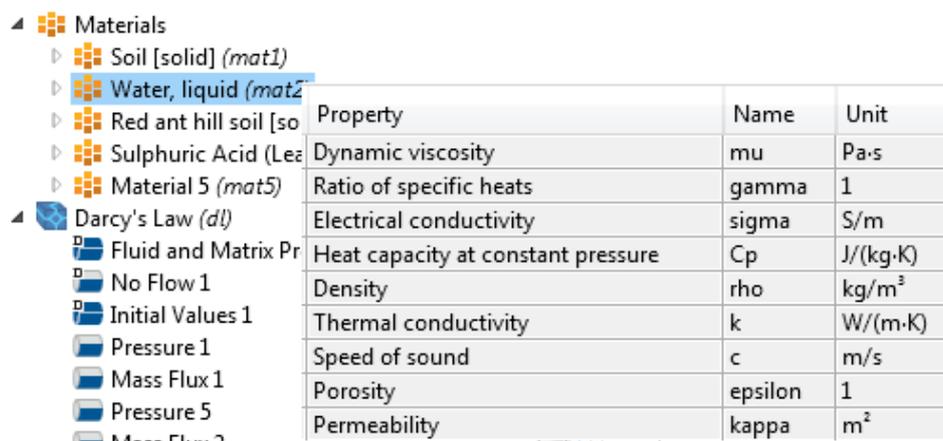


Рисунок 5 – Заданные начальные условия

Picture 5 – Set initial conditions

3. *Построение геометрии.* Представлена 3D – модель условно разделенная на три слоя: два нижних слоя представляют собой пористую среду с различными степенями проницаемости, верхний слой является имитацией столба жидкости грунтовых вод (рисунок 6).

4. *Результаты моделирования.* Кинетика процесса определяется массопередачей растворителя и растворенного урана, обусловленной в свою очередь, градиентом их концентрации.

Важнейшим параметром, определяющим кинетику выщелачивания урана из массивных руд с искусственной проницаемостью, является скорость проникновения растворителя в рудный монолит. Она зависит от числа и размера пор и капилляров в рудном монолите и степени структурных изменений их в процессе выщелачивания.

Эти изменения обычно обусловлены вещественным составом руды и характером её взаимодействия с растворителем. Образование и осаждение в порах вторичных химических соединений могут изменить кинетику извлечения урана. Особенно неблагоприятными являются руды, содержащие карбонатные минералы: при их обработке растворами серной кислоты образуется слабо-растворимый гипс, коагулирующий поры и капилляры.

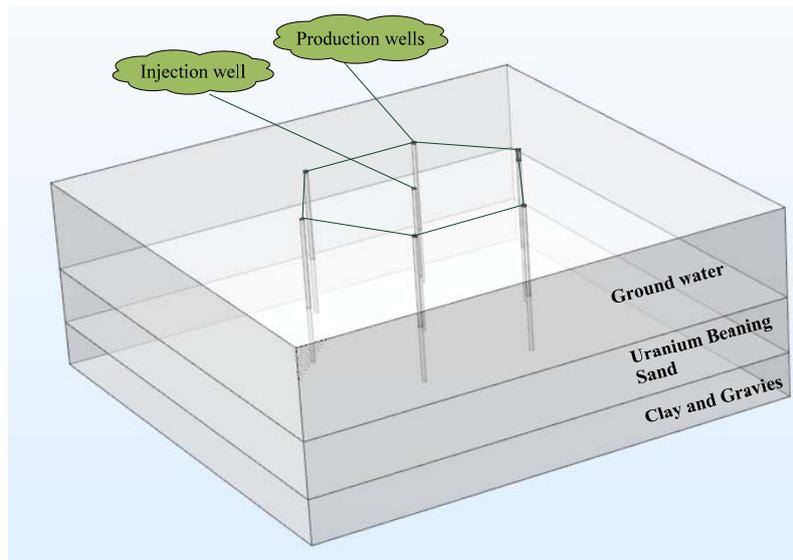


Рисунок 6 – Построение 3D геометрии

Figure 6 – Constructing 3D geometry

По характеру проникновения растворителя внутрь куска руды подразделяется на следующие три типа:

1. Руды, в которых растворитель просачивается более или менее одновременно и постоянно со всех сторон;
2. Руды, в которых растворитель проникает вначале по трещинам и плоскостям слоистости, т.е. по основным каналам, а затем из них поступает в мельчайшие поры и капилляры;
3. Руды, которые при обработке растворителем разрушаются.

Пористость рудных монолитов обычно во много раз ниже пористости глин, однако размеры пор и капилляров в куске выше, чем в глинистых породах.

Как видно из результатов моделирования в среде Comsol, представленные на рисунках 7-10 выщелачивания в стационарных режимах наблюдаются симметричные картины процесса фильтрации с образованием застойных зон процесса.

Для устранения застойных зон рекомендуется постоянно менять режим выщелачивания по скважинам.

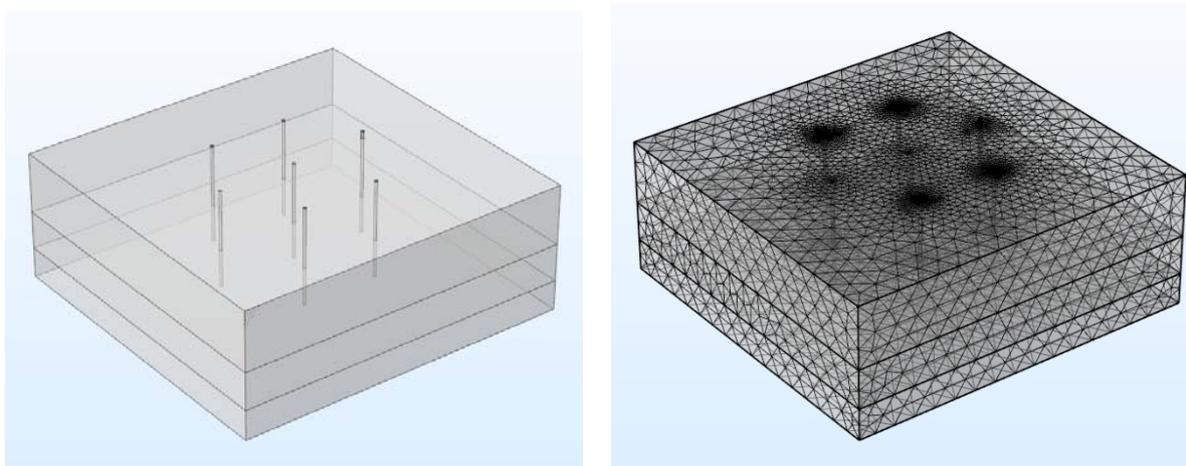


Рисунок 7 – Построение геометрии моделируемого объекта и разбиение на сетки

Figure 7 – Construction of the geometry of the simulated object and the partition into the grid

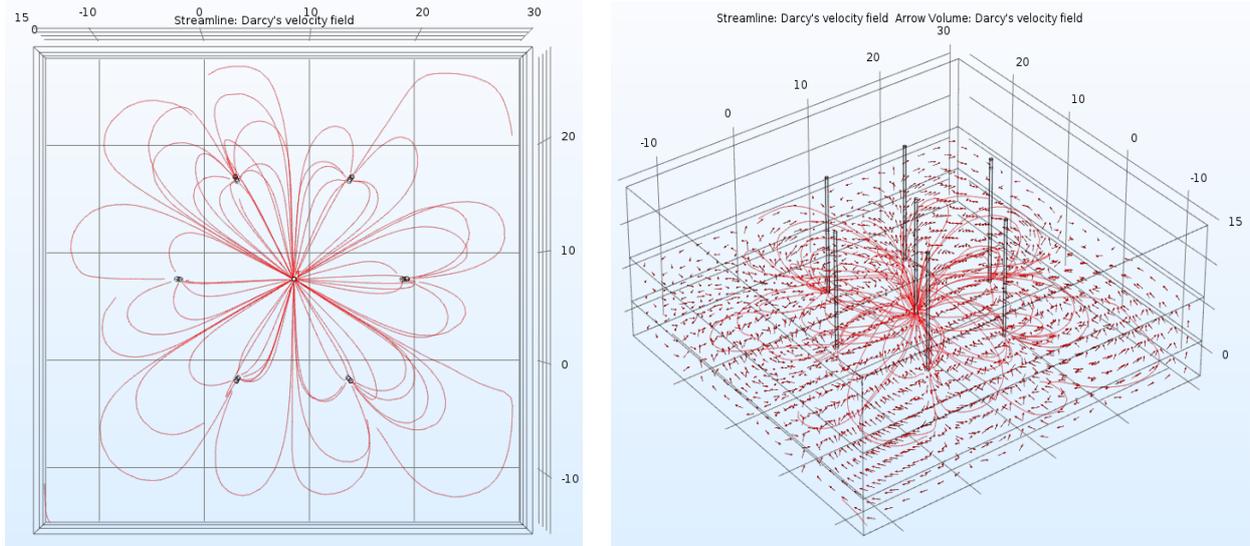


Рисунок 8 – Распределение полей гидродинамического напора между откачной и закачных скважинами
 Figure 8 – Distribution of hydrodynamic pressure field between the pumping and injection wells

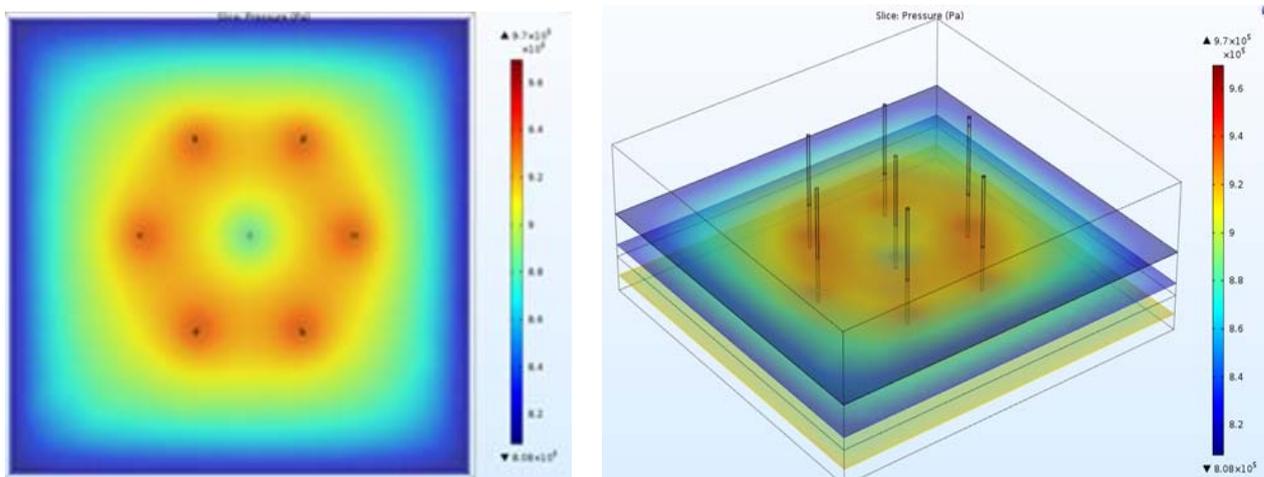


Рисунок 9 – Контур распределения давления
 Figure 9 – Pressure distribution circuit

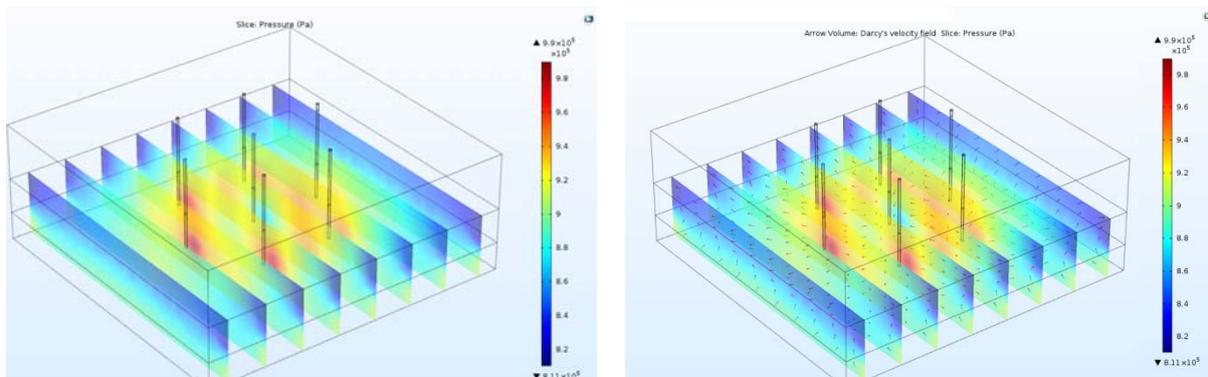


Рисунок 10 – Контур распределения давления по слоям
 Figure 10 – Circuit the pressure distribution over the layers

6. Процесс визуализации. Преимущество современных систем визуализации состоит в том, что они не только отображают статическое состояние объекта, но также позволяют:

- наблюдать технологический процесс в динамике;
- архивировать переменные процесса, с последующим выводом их на печать в форме отчет;
- управлять процессом с экрана персонального компьютера (PC) или операторской панели (OP) посредством мышки и клавиатуры;
- выводить на печать бланки отчётов и заданий;
- изменять параметры процесса через PC или OP;
- вносить изменения в задания на производство продукции;
- сохранять в памяти PC режимы и рецепты производства;
- выдавать сообщения по заданным событиям.

А также позволяет оперативно и аналитически обрабатывать накопленных данных.

Заключение. Как и в случае перколяции, при подземном выщелачивании урана из руд с естественной проницаемостью транспорт растворителя к поверхности и растворенных продуктов реакции от поверхности взаимодействия определяется скоростью просачивания растворов. Реакция между жидким растворителем и твердым веществом развивается от поверхности частиц к центру, причем до полного завершения выщелачивания в центре остается непрореагировавшее ядро, а на поверхности – твердый продукт.

Рудный материал, обладая пористой структурой, затрудняет процесс диффузии, оказывая ей сопротивление. Чем меньше сопротивление диффузии, тем выше скорость выщелачивания и степень извлечения урана при заданной продолжительности процесса.

Анализ моделирования показывает, что процесс выщелачивания подавляющей части урановых минералов из руд с естественной проницаемостью определяется законами диффузионной кинетики как контролирующим фактором общей скорости массопередачи и законами гидродинамики, что позволяет производить количественную оценку скорости выщелачивания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bundschuh J., Subrez Arriaga M.C. Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems. 2010. P. 217-284.
- [2] Mukhanov B.K., Omirbekova Zh.Zh., Usenov K.A., Wójcik W. Simulating In-situ Leaching Process Using COMSOL Multiphysics. *INTL International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2014. Vol. 60, N 3. P. 213-217.
- [3] Manual of acid in situ leach uranium mining technology. IAEA, VIENNA, 2001. P. 105-122.
- [4] Mukhanov B.K., Usenov A.K., Omirbekova Zh.Zh. Process of in-situ leaching modeling in a Comsol Multiphysics environment // The 2nd International Virtual Conference on Advanced Scientific Results (SCIECONF-2014), 2014 (held in Zilina, Slovakia). P. 499-503.
- [5] Mukhanov B., Omirbekova Zh., Alimanova M., Jumadilova S., Kozhamzharova D., Baimuratov O. A model of virtual training application for simulation of technological processes. *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 56, p. 177-182.
- [6] Lisunets N.L., Smirnov O.M., Tsepin M.A. Simulation of the processes of aluminum alloys preforms and semi-finished products manufacture under influence of technological heredity and phase transitions. *Physical and Numerical Simulation of Materials Processing*. 2008. Vol. 575-578. P. 1134-1138.
- [7] Vabishhevich P.N., Vasil'ev V.I., Vasil'eva M.V., Nikiforov D.J.A., CHislennoe reshenie odnoj obratnoj zadachi fil'tracii. *Fiziko-matematicheskie nauki*. 2015. Vol. 157, kn. 4. P. 79-89.
- [8] Kim Y.S., Kim H.M. Design of a New Virtual Interaction Based PLC Training Using Virtual Sensors and Actuators: System and Its Application. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013. Vol. 2013.
- [9] Bommer P.M., Schechter R.S. Mathematical modeling of in-situ uranium leaching. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1979. N 19. P. 34-45.
- [10] Schechter S., Bommer P.M. Optimization of uranium leach mining. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1982. N 22. P. 133-141.
- [11] Kabir M.I., Lake L.W., Schechter R.S. Evaluation of one-well uranium leaching test restoration. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1982. N 22. P. 43-56.
- [12] Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the Knowledge in a Neural Network. *NIPS 2014 Deep Learn. Work.*, 2015, p. 1-9.
- [13] Walsh M.P., Schechter, R. S., Humenick M. J., Hill A. D., Silberberg I. H. A Model For Predicting The Restoration Of And Ammonium Migration From In Situ Mine Sites. *AIME, South Texas Uranium Seminar – Corpus Christi, Texas*. 1978. P. 248-312.
- [14] Kabir M.I., Lake L.W., A minifield test of in situ uranium leaching. *In Unknown Host Publication Title. New York, NY, USA: AIME*, 1994. P. 43-67.

- [15] Yazikov V.G., Zabaznov V.L., Petrov NN, Rogov E.I., Rogov A.E. *Geotekhnologiya urana na mestorozhdeniyah Kazahstana*, 2001.
- [16] Kurth D.J., Schmidt R.D. Computer modeling of five-spot well pattern fluid flow during in situ uranium leaching. *Washington: US Bureau of Mines*, 1978. P. 33-46.
- [17] Kurth D.J., Schmidt R.D. Computer modeling of fluid flow during production and environmental restoration phases of in situ uranium leaching. *Washington: US Bureau of Mines*, 1978.
- [18] Sandu F., Moga H., Talaba P., Stanca A.C. Online educational platform for experiment-based training and updating of SCADA operators. Applied and Theoretical Electricity (ICATE). *IEEE conference publications: 2012 International Conference*, 2012. P. 1-7.
- [19] Mashkov V., Smolarz A., Lytvynenko V., DEVELOPMENT ISSUES IN ALGORITHMS FOR SYSTEM LEVEL SELF-DIAGNOSIS. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2016. Vol. 6, N 1. P. 26-28.
- [20] Joung-souk S., Doo-hun L. Adaptive Tutoring and Training System Based on Intelligent Agent. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*. 2006. Vol. 1, N 3. P. 6-11.
- [21] Dongfeng Sh., Fugee T. Modelling and diagnosis of feedback-controlled processes using dynamic PCA and neural networks. *INT. J. PROD. RES.* 2003. Vol. 41, N 2. P. 365-379.

REFERENCES

- [1] Bundschuh J., Suñez Arriaga M.C. Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems. 2010. P. 217-284.
- [2] Mukhanov B.K., Omirbekova Zh.Zh., Usenov K.A., Wójcik W. Simulating In-situ Leaching Process Using COMSOL Multiphysics. *INTL International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2014. Vol. 60, N 3. P. 213-217.
- [3] Manual of acid in situ leach uranium mining technology. IAEA, VIENNA, 2001. P. 105-122.
- [4] Mukhanov B.K., Usenov A.K., Omirbekova Zh.Zh. Process of in-situ leaching modeling in a Comsol Multiphysics environment // The 2nd International Virtual Conference on Advanced Scientific Results (SCIECONF-2014), 2014 (held in Zilina, Slovakia). P. 499-503.
- [5] Mukhanov B., Omirbekova Zh., Alimanova M., Jumadilova S., Kozhamzharova D., Baimuratov O. A model of virtual training application for simulation of technological processes. *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 56, p. 177-182.
- [6] Lisunets N.L., Smirnov O.M., Tsepin M.A. Simulation of the processes of aluminum alloys preforms and semi-finished products manufacture under influence of technological heredity and phase transitions. *Physical and Numerical Simulation of Materials Processing*. 2008. Vol. 575-578. P. 1134-1138.
- [7] Vabishhevich P.N., Vasil'ev V.I., Vasil'eva M.V., Nikiforov D.JA., CHislenoe reshenie odnoj obratnoj zadachi fil'tracii. *Fiziko-matematicheskie nauki*. 2015. Vol. 157, kn. 4. P. 79-89.
- [8] Kim Y.S., Kim H.M. Design of a New Virtual Interaction Based PLC Training Using Virtual Sensors and Actuators: System and Its Application. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013. Vol. 2013.
- [9] Bommer P.M., Schechter R.S. Mathematical modeling of in-situ uranium leaching. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1979. N 19. P. 34-45.
- [10] Schechter S., Bommer P.M. Optimization of uranium leach mining. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1982. N 22. P. 133-141.
- [11] Kabir M.I., Lake L.W., Schechter R.S. Evaluation of one-well uranium leaching test restoration. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1982. N 22. P. 43-56.
- [12] Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the Knowledge in a Neural Network. *NIPS 2014 Deep Learn. Work.*, 2015, p. 1-9.
- [13] Walsh M.P., Schechter, R. S., Humenick M. J., Hill A. D., Silberberg I. H. A Model For Predicting The Restoration Of And Ammonium Migration From In Situ Mine Sites. *AIME, South Texas Uranium Seminar – Corpus Christi, Texas*. 1978. P. 248-312.
- [14] Kabir M.I., Lake L.W., A minifield test of in situ uranium leaching. *In Unknown Host Publication Title. New York, NY, USA: AIME*, 1994. P. 43-67.
- [15] Yazikov V.G., Zabaznov V.L., Petrov NN, Rogov E.I., Rogov A.E. *Geotekhnologiya urana na mestorozhdeniyah Kazahstana*, 2001.
- [16] Kurth D.J., Schmidt R.D. Computer modeling of five-spot well pattern fluid flow during in situ uranium leaching. *Washington: US Bureau of Mines*, 1978. P. 33-46.
- [17] Kurth D.J., Schmidt R.D. Computer modeling of fluid flow during production and environmental restoration phases of in situ uranium leaching. *Washington: US Bureau of Mines*, 1978.
- [18] Sandu F., Moga H., Talaba P., Stanca A.C. Online educational platform for experiment-based training and updating of SCADA operators. Applied and Theoretical Electricity (ICATE). *IEEE conference publications: 2012 International Conference*, 2012. P. 1-7.
- [19] Mashkov V., Smolarz A., Lytvynenko V., DEVELOPMENT ISSUES IN ALGORITHMS FOR SYSTEM LEVEL SELF-DIAGNOSIS. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2016. Vol. 6, N 1. P. 26-28.
- [20] Joung-souk S., Doo-hun L. Adaptive Tutoring and Training System Based on Intelligent Agent. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*. 2006. Vol. 1, N 3. P. 6-11.
- [21] Dongfeng Sh., Fugee T. Modelling and diagnosis of feedback-controlled processes using dynamic PCA and neural networks. *INT. J. PROD. RES.* 2003. Vol. 41, N 2. P. 365-379.

Б. К. Мұқанов¹, W. Wójcik², Ж. Ж. Өмірбекова¹, Е. Ж. Орақбаев³

¹Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан,

²Люблин техникалық университеті, Люблин, Польша,

³Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ КӨМЕГІМЕН МЕТАЛДАРДЫ ЖЕР АСТЫ СІЛТІСІЗДЕНДІРУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Мақала технологиялық процестің динамикасын бағалауға мүмкіндік беретін уранды жер асты сілтісіздендіру процестерін жер асты сандық модельдеуге арналған. Жер асты сілтісіздендіру процесін тиімді модельдеу бүкіл әлемдегі тау-кен қазу кәсіпорындарының көбісінде сұранысқа ие өзекті тапсырма болып табылады. Мақалада келтірілген математикалық модельдеу жер асты сілтісіздендіру динамикасын сипаттайды. Соның өзінде де, жер асты сілтісіздендіруінің өзіндік ерекшеліктері бар екендігін ескерген жөн, соған байланысты оны қолдану спецификалық болып келеді, процесті талдау және басқару үшін нақты білімдер мен құрал-жабдықтарды талап етеді. Мақалада жасалынған концептуалды модель геологиялық жағдай, геометриялық қасиеттер, гидравликалық параметрлер, қатты фазалық қасиеттер, соның ішінде біртектілік пен изотроптылық, сұйықтың қасиеттері, шекаралық жағдайлар туралы барлық ақпаратты ескеруге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: жер асты сілтісіздендіру, концептуалды модель, сандық модельдеу, математикалық модельдеу, Дарси заңы, визуализация.

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www.nauka-nanrk.kz

ISSN 2518-170X (Online), ISSN 2224-5278 (Print)

<http://geolog-technical.kz/index.php/kz/>

Верстка Д. Н. Калкабековой

Подписано в печать 15.02.2017.

Формат 70x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

15,25 п.л. Тираж 300. Заказ 1.