

УДК 681.518.5:004.942.047.37

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
СКВАЖИН ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

**ЖЕРАСТЫ ШАЙМАЛАУ ҰНҒЫМАЛАРЫНЫҢ ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ
ҮЛГІЛЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ҚҰРУ**

**RESEARCH AND BUILD OF HYDRODYNAMIC MODELS OF IN-SITU
LEACHING WELLS**

Б.К. МУХАНОВ, Е.Ж. ОРАКБАЕВ, Ж.Ж. ОМИРБЕКОВА, Р.Б. САРБАСОВА, Ш.К. АДИЛОВА
Б.Қ. МҰҚАНОВ, Е.Ж. ОРАКБАЕВ, Ж.Ж. ӨМІРБЕКОВА, Р.Б. САРБАСОВА, Ш.К. ӘДІЛОВА
B.K. MUKHANOV, Y.ZH. ORAKBAYEV, ZH.ZH. OMIRBEKOVA, R.B. SARBASSOVA., SH.K. ADILOVA

(Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени
К.И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан)
(Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу Университеті
Алматы, Қазақстан Республикасы)
(Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan)
E-mail: orakbaev_erbol@mail.ru

В статье обосновывается актуальность исследования моделей процесса добычи урана методом подземного выщелачивания, которые позволят оценить динамику технологического процесса. Все больше внимания уделяется вопросам моделирования процессов подземного выщелачивания, с целью решения задач поднятия эффективности рассматриваемого процесса.

Мақала уран өндіру процесінің модельдерін жерасты сілтілеу әдісімен зерттеудің өзектілігіне арналған, бұл технологиялық процестің динамикасын бағалауға мүмкіндік береді. Қарастырылып отырған процестің тиімділігін арттыру мәселелерін шешу мақсатында жерасты шаймалау процесін модельдеуге көбірек көңіл бөлінеді.

The article proves the urgency of studying the models of the uranium mining process by the method of in-situ leaching, which will allow to evaluate the dynamics of the technological process. More and more attention is paid to the modeling of the process of in-situ leaching, in order to solve problems is to raise the efficiency of the process under consideration.

Ключевые слова: подземное выщелачивание, гидродинамические модели, моделирование, оптимальное управление, система управления.

Негізгі сөздер: жерасты шаймалау, гидродинамикалық зерттеу, модельдеу, оптималды басқару, басқару жүйесі.

Key words: in-situ leaching, leaching solutions, modeling, optimal control, control system.

Введение

Геотехнологический метод добычи полезных ископаемых является наиболее эффективным и активно внедряется в Казахстане. Эффективность этого метода добычи во многом определяется оперативной оценкой основных параметров гидродинамического состояния скважин и слоев рудного тела, создание математической модели, основанной на этих оценках [1].

Существующая практика и системы управления геотехнологическим полем характеризуются тем, что управление технологическим процессом подземного выщелачивания заключается в основном, в поддержании балансных расходных характеристик по выщелачивающим и продуктовым растворам. Задания по расходам формируются на основе геотехнологических данных и опыта, и навыков геотехнолога рудника. В этом случае ведение процесса осуществляется в условиях информационной неопределенности текущих характеристик фильтрующих свойств среды, таких как проницаемость рудного тела, связывающих скорость фильтрации с градиентом напора [2].

В этой связи весьма актуальна разработка новых систем, использующих в контуре управления результаты моделирования процесса ПВ.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований является технологический процесс подземного выщелачивания. Методом подземного выщелачивания разрабатывают экзогенные месторождения урана, которые находятся в хорошо проницаемых подземных водоносных горизонтах. 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 [3].

Поэтому, чтобы получить предварительное представление о технико-экономической целесообразности, выбрать процедуру выщелачивания и рассчитать ожидаемые результаты, необходимо провести специальные исследования и моделирование процесса.

Исследования и моделирование проводятся до и во время процесса подземного выщелачивания, а также после его прекращения. Они позволяют анализировать динамику процесса, оценивать объем и массу руд и пород, подлежащих выщелачиванию, и прогнозировать извлечение урана, эффективность выщелачивания и его влияние на грунтовые воды и породы [4].

Подземное выщелачивание имеет ряд характеристик, которые также требуют конкретных и эффективных средств проектирования и контроля. Подземное выщелачивание происходит под землей и не может непосредственно наблюдаться и контролироваться. Контроль подземного выщелачивания ограничивается закачкой выщелачивающего раствора в нагнетательные скважины и откачкой продуктивных растворов из восстановительных скважин, а также ограниченным количеством наблюдательных скважин [5].

Метод исследований построения математической модели процесса. Подземное выщелачивание требует различных видов моделирования, как математических, так и физических. Математическое моделирование подземного выщелачивания включает расчеты, которые определяют гидродинамику процесса, растворимость, конвективное и диффузионное движение растворимых компонентов.

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

Результаты и их обсуждение

Технологическая схема ПВ состоит из элементов. Методом скважинного подземного выщелачивания разрабатывают месторождения урана, в которых рудное тело находится в хорошо проницаемой геологической среде, как правило, в подземном водоносном пласте (5) как показано на рисунке 1. Извлечение урана из рудного тела (4) происходит с помощью системы технологических скважин, которые объединяются в технологические ячейки и блоки. Через закачные (нагнетательные) скважины (1) в продуктивный горизонт нагнетается выщелачивающий (рабочий) раствор, содержащий реагенты, способные растворять минералы урана. В результате физико-химического взаимодействия урано-

вых минералов и вмещающих пород с выщелачивающими реагентами в подземном водоносном горизонте образуется содержащий уран продуктивный раствор, который выдается на поверхность посредством системы откачных скважин (3). В процессе переработки продуктивного раствора из него извлекается уран, а оставшиеся маточные растворы доукрепляются выщелачивающими реагентами и снова подаются в нагнетательные скважины в качестве рабочего раствора. В настоящее время в качестве рабочих агентов (рабочих растворов) при подземном выщелачивании урана применяются слабые водные растворы серной кислоты.

Для обеспечения необходимого дебита откачных скважин и возможности транспортировки продуктивных растворов до сборника промплощадки принят способ подъема растворов с использованием глубинных насосов(2). Подача (нагнетание) выщелачивающих растворов в скважины осуществляется закачными скважинами. Управление скважинными глубинными насосами осуществляется от узла приема продуктивных растворов[6].

На рис. 1 представлен разрез закачной и откачной скважины при подземном выщелачивании урана.

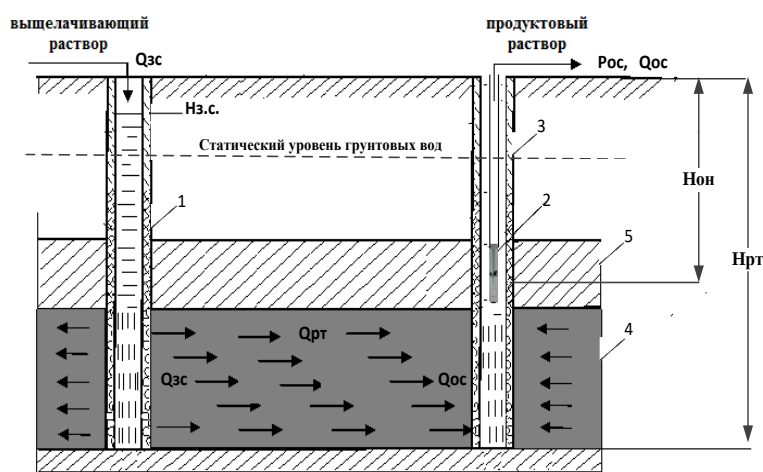


Рисунок 1. - Технологическая схема подземного выщелачивания урана

Построение математической модели технологической системы подземного выщелачивания.

Закачная скважина представляет собой вертикальный трубопровод и здесь определяющим в формировании перепада давления является столб жидкости.

Как известно, столб жидкости высотой 9,8 м давит на устье с силой 0,01 МПа.

Поэтому модель скважины можно представить в виде:

$$W \frac{dH_{zc}}{dt} = Q_{zc} - Q_{pm} \quad (1.1)$$

где:

H_{zc} — уровень выщелачивающего раствора закачной скважине (м);

W — емкость закачной скважины (m^3);

Q_{zc} — расход выщелачивающего раствора, падающего в закачную скважину ($m^3/час$);

Q_{pm} — расход выщелачивающего раствора, поступающий из закачной скважины в рудное тело через фильтр скважины ($m^3/час$).

Если расход закачной скважины равен расходу рудного тела $Q_{zc} = Q_{pm}$, тогда уровень закачной скважины стабилен $H_{zc} = const$. Давление, которое создает закачная скважина при установившемся режиме работы рассчитывается:

$$P_{zc} = H_{zc} \rho g \quad (1.2)$$

Модель глубинного насоса основывается на расходно-напорной характеристике создаваемой насосом, и имеет вид:

$$\Delta P_{oc} = a_0 + a_1 Q_{oc} + a_2 Q_{oc}^2 + a_3 Q_{oc}^3 \quad (1.3)$$

где: ΔP_{oc} — напор, создаваемый насосом (атм);

Q_{oc} — расход жидкости ($m^3/ч$);

a_0, a_1, a_2, a_3 — аппроксимирующие коэффициенты.

Расходно-напорная характеристика насосов из паспорта глубинного насоса предс-

тавлена на рисунке 2.

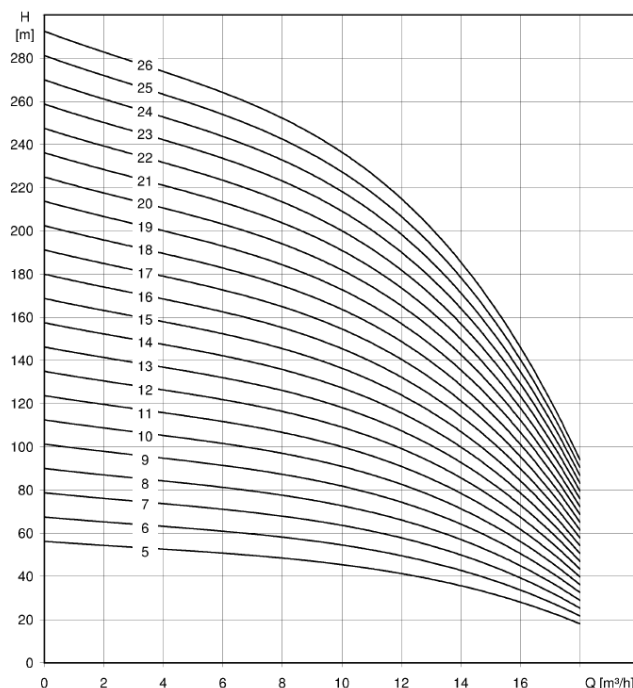


Рисунок 2. - Семейство расходно-напорных характеристик глубинного насоса

Рассмотрим кратко основные закономерности фильтрации растворов при плоско-радиальном его движении в потенциальном поле напора жидкости в неограниченном плоском пространстве между двумя непроницаемыми почвой рудоносного пласта.

Ясно, что жидкость – реагент движется в пористой среде пласта под действием разницы напора, создаваемого нагнетательными насосами на закачных скважинах, погружными отсасывающими насосами или эрлифтами на откачных скважинах, фоновым естественным потокам и разницей столба жидкости раствора между откачным и закачным скважинам и из физики процесса ясно, что чем больше перепад (градиент) давления на рудном теле, тем меньше потерь выщелачивающего раствора, тем лучше идет процесс выщелачивания, то есть растет скорость фильтрации.

В качестве критерия управления выбран показатель, отражающий градиент давления в рудном теле от закачной до откачной скважины, запишем выражение для технологической цепочки: закачная скважина, рудное тело, откачная скважина.

Расчет перепада давления на рудном теле проводится по следующей схеме:

$$\Delta P_{pm} = R_{pm} \cdot Q_{pm} \quad (1.4)$$

$$\Delta P_{pm} = P_{zc} - P_{yoc} \quad (1.5)$$

где, ΔP_{yoc} – давление на всасглубинного насоса (атм);

$$P_{yoc} = (H_{pm} + H_0) \rho g \quad (1.5)$$

где, H_0 – высота точка равновесия (м);

Расчет точки равновесия от рудного тела:

$$H_0 = \left| \frac{P_{изм} - P_{ст}}{\rho g} \right| \quad (1.6)$$

где: $P_{изм}$ – давление на устье глубинного насоса (атм); $P_{ст}$ – давление столба жидкости в откачной скважине (атм);

Исследования модели технологической схемы ПВ на Matlab. Модель процесса ПВ, представленная выражениями (1.2) - (1.6), была набрана для исследования в среде Matlab.

В нашем случае была рассмотрена технологическая цепочка: закачная скважина, рудное тело, откачная скважина со скважинным насосом мощностью 7,5 кВт.

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

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

$$\Delta P_{oc} = 198 - 6,08 Q_{oc} + 0,63 Q_{oc}^2 - 0,04 Q_{oc}^3, \quad (1.7)$$

Модель глубинного насоса показана на следующем рисунке 3.

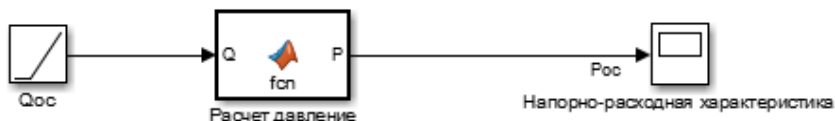


Рисунок 3. - Модель глубинного насоса на Matlab.

И построена расходно-напорная характеристика насоса (рис. 4.)

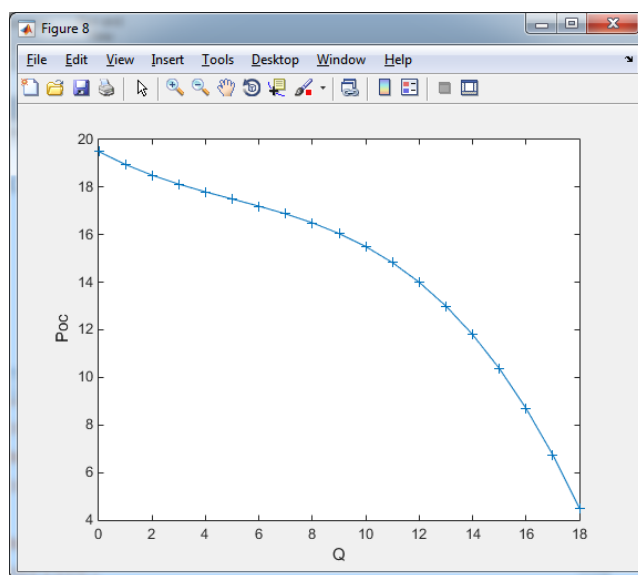


Рисунок 4. - Расходно-напорная характеристика глубинного насоса

Модель технологической схемы процесса ПВ (закачная скважина, рудное тело, откачная скважина) показана на рисунке 5.

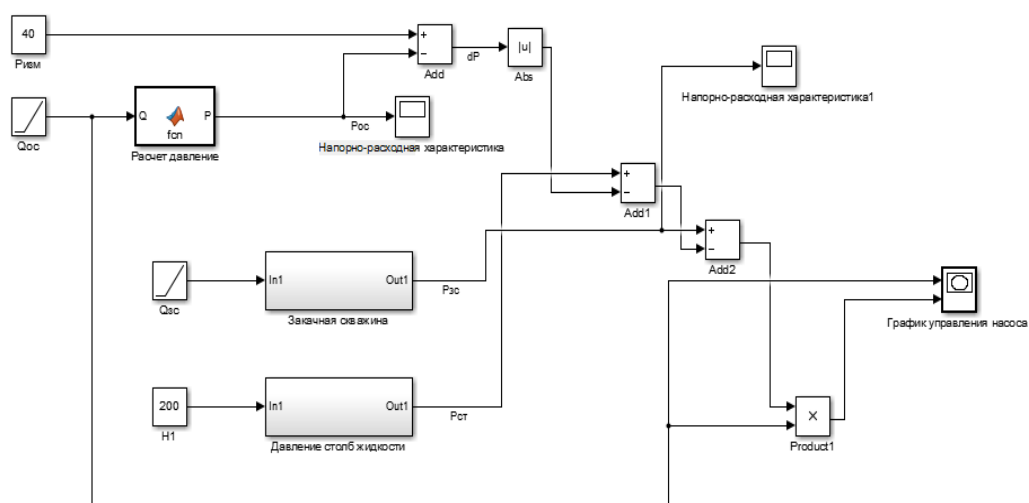


Рисунок 5. - Модель технологической схемы процесса ПВ

Как показали исследования на модели, для рассматриваемой технологической схемы зависимость перепада давления на рудном

теле от расхода растворов имеет вид как на рисунке 6.

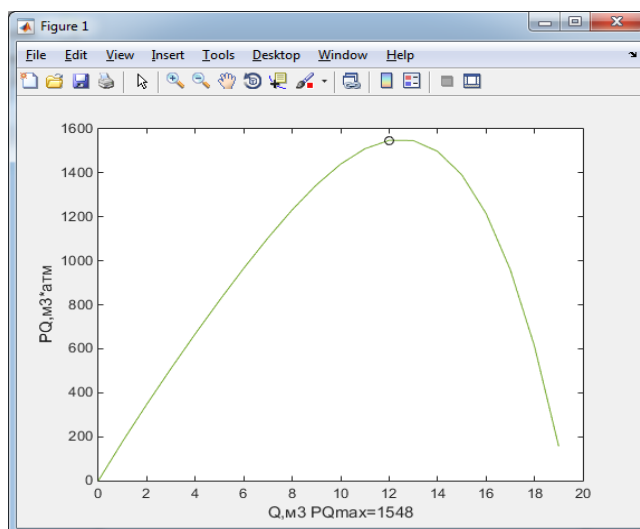


Рисунок 6. - Модель перепада давления на рудном теле

При подземном выщелачивании металлов остается до сих пор нерешенным вопрос о величине напора на закачных скважинах. Так, при его увеличении растет дебит скважин, но уменьшается продуктивность раствора на выходе. А при уменьшении напора уменьшается пропорционально дебит скважин, с которым растет концентрация металла в продуктивном растворе, но падает скорость фильтрации раствора и следовательно скорость выщелачивания металла. В этой связи, видимо, существует оптимальный по избранному критерию напор на закачных скважинах [5,6]. Модель обеспечивает поиск решения такого необходимого расхода на закачную скважину, обеспечивающего максимальную продуктивность раствора на выходе.

Выводы

В настоящее время для определения исходных гидродинамических параметров скважин и пластов необходимо проводить специальные исследования скважин с применением глубинных приборов и информационно-измерительных средств. Причем наиболее информативным параметром, характеризующим работу процесс ПВ, является градиент перепада давления в рудном теле. Получение измерений других параметров, таких как дебит скважины, устьевого давления, пьезопроводность, расходно-напорная характеристика погружного электродвигателя, повышает качество идентификации

гидродинамической модели, а следовательно, позволяет повысить надежность управления процессом ПВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. -№ 3. -P. 213-217.
2. Manual of acid in situ leach uranium mining technology., IAEA, VIENNA, 2001. -P. 105-122.
3. 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.
4. Соловьев И.Г., Ведерникова Ю.А. Разработка и использование гидродинамических моделей скважинных систем, оборудованных установками погружных электроцентробежных насосов // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН. -2002, -№. 1. -С. 85-91.
5. Рогов Е.И., Языков В.Г., Рогов А.Е., Гидродинамическая модель подземного выщелачивания урана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), Москва, 2000, №5, с. 40-42.
6. Муханов Б.К., Омирбекова Ж.Ж., Оракбаев Е.Ж., Исследование и разработка системы оптимального управления процессом подземного выщелачивания // Вестник Национальной Академии Наук Республики Казахстан, 2016. - №5. -С. 178-185.