

---

## ПРИРОДНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ УРАНА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ РУДНЫХ ТЕЛ И ПОРОД\*

А.Е. Воробьев<sup>1</sup>, Т.В. Чекушина<sup>2</sup>, И.В. Соколов<sup>1</sup>,  
Е.В. Чекушина<sup>1</sup>, Ж.Ю. Абдулатипов<sup>1</sup>, А.В. Синченко<sup>1</sup>,  
А. Роман<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кафедра нефтепромысловой геологии,  
горного и нефтегазового дела  
Инженерный факультет  
Российский университет дружбы народов  
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

<sup>2</sup>Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем комплексного освоения недр РАН  
Крюковский тупик, 4, Москва, Россия, 111020

Выщелачивание металла начинается после подачи рабочего раствора в массив и заканчивается в короткие сроки. Длительным является процесс выщелачивания в микротрещинах, и более продолжительным — процесс выщелачивания в микропоровом пространстве.

Важным параметром выщелачивания урана является площадь активной поверхности обрабатываемых минералов, что означает разрушение руд и пород.

**Ключевые слова:** природное выщелачивание, разрушение твердых тел, переходной поверхностный слой, металл, энергия, трещина.

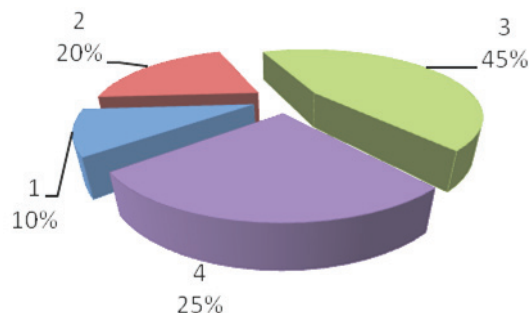
Процесс выщелачивания полезного компонента, происходящий при контакте химически активного реагента с рудными включениями, определяется структурными и фильтрационными характеристиками разрабатываемого породного массива и слагающих его пород [1], а также свойствами выщелачивающего раствора, объемом и скоростью его продвижения (рис. 1).

Следовательно, основу аналитической модели (механизма выщелачивания руд) должны составлять функциональные между технологическими параметрами собственно процесса выщелачивания металлов и структурными характеристиками выщелачиваемого рудного массива.

Выщелачивание металла с поверхности отдельностей начинается практически сразу после подачи рабочего раствора в массив и заканчивается в наиболее короткие сроки. Более длительным является процесс выщелачивания в микротрещинах, наиболее продолжительным — процесс выщелачивания, происходящий в микропоровом пространстве.

---

\* Статья написана с использованием материалов работы, проводимой в рамках выполнения государственного контракта № 02.740.11.0681 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы: Научно-исследовательские работы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области переработки и утилизации техногенных образований и отходов» шифр 2010-1.1-222-039 по теме: «Разработка ресурсосберегающей технологии управляемой природной переработки минеральных отходов урановых рудников» (шифр заявки 2010-1.1-222-039-084).



**Рис. 1.** Соотношение основных факторов, определяющих параметры выщелачивания уран [2]:

- 1 — свойства выщелачивающих растворов (активность); 2 — свойства урановых минералов (легко- или труднорастворимые); 3 — площадь поверхности урановых минералов; 4 — объем и скорость продвижения выщелачивающих растворов

Наиболее сложный для описания процесс выщелачивания в микропоровом пространстве определяется временем капиллярной пропитки, а также характеристиками диффузионного переноса ионов металла в стесненных условиях порового канала.

Таким образом, с точки зрения описания наиболее важным параметром выщелачивания урана является площадь активной поверхности обрабатываемых минералов, поэтому следует более детально рассмотреть возможности ее получения, т.е. разрушения руд и пород.

Началу теории разрушения твердых тел положили работы А. Гриффитса. Одним из важных результатов А. Гриффитса стал сформулированный им критерий разрушения тела с трещиной, согласно которому рост трещины должен быть энергетически выгодным процессом с преобразованием энергии. Условие развития трещины А. Гриффитс сформулировал в виде энергетического баланса

$$\frac{\partial}{\partial \ell}(W - \Gamma), \quad (1)$$

где  $W$  — потенциальная энергия деформации пластины;  $\Gamma$  — поверхностная энергия трещины;  $\ell$  — полудлина трещины.

В этом случае условие разрушения можно записать в виде

$$\left| \frac{\partial W}{\partial \ell} \right| \geq \frac{\partial \Gamma}{\partial \ell}. \quad (2)$$

Условие (2) и представляет суть подхода А. Гриффитса; трещина в твердом теле будет развиваться во время его деформации, если скорость освобождения потенциальной энергии деформации будет больше прироста поверхностной энергии тела в результате образования новых поверхностей.

Поверхностная энергия трещины для пластины единичной толщины имеет вид

$$\Gamma = 4\ell\gamma, \quad (3)$$

где  $\gamma$  — удельная поверхностная энергия разрушения.

Если исходить из того, что элемент длины трещины определяется произведением линейного элемента поверхности на некоторую функцию  $\Phi$ , зависящую от напряженного состояния в окрестности данного линейного элемента, то уравнение траектории трещины можно получить из условия, что функционал вида

$$J = \int_{u_1}^{u_2} \Phi(u, v) \sqrt{E + 2Fv' + G(v')^2} dv \quad (4)$$

принимает минимальное значение, т.е.

$$\delta J = 0. \quad (5)$$

Для хрупкого разрушения можно полагать, что функция  $\Phi(u, v)$  пропорциональна нормальному наибольшему напряжению или наибольшей линейной деформации для тела без трещины, находящегося под действием той же системы нагрузок. Другими словами, траектория трещины представляет собой геодезическую линию в неевклидовом пространстве, метрика которого зависит от напряженно-деформированного состояния.

Тогда уравнение Эйлера—Лагранжа для вариационной задачи (4) и (5) примет вид

$$\frac{\partial M}{\partial u} - \frac{d}{dv} \frac{\partial M}{\partial v'} = 0, \quad (6)$$

где  $M = \Phi(u, v) \sqrt{E + 2Fv' + G(v')^2}$ .

В общем случае поведение стационарных трещин можно описать с помощью вариационного условия:  $\delta E = 0$ , а нестационарных — с помощью уравнения

$$\int_{t_0}^{t_1} \delta E dt = 0, \quad (7)$$

где  $E = \int_{\ell_0}^{\ell(t)} L ds$  — функционал, отражающий разность энергий поглощения  $\int_0^{\ell(e)} \gamma ds$  (рас-

ходуемой на процесс разрушения) и снабжения —  $\int_0^{\ell(t)} \phi ds$  (выделяющейся из-за роста трещины),  $L = \gamma - \phi$ .

Этот функционал можно рассматривать как свободную энергию либо как величину, пропорциональную приращению внутренней энтропии. Интенсивность затрат энергии на разрушение «энергопоглощения»  $\gamma$  представляет энергию, необходимую для образования единицы площади появляющейся новой поверхности трещины. Значение  $\gamma$  зависит от локальных сопротивлений разделению частей, пластичности, вязкости материала и от их изменения с ростом трещины. Интенсивность выделения энергии «энергоснабжение» в связи с единичным приростом площади трещины  $\phi$  расходуется на образование трещины и только после

образования элемента трещины, избыток энергии снабжения может диссипировать или трансформироваться в кинетическую энергию [4].

Большинство существующих в природе механических систем при свободном движении рассеивают упорядоченную кинетическую энергию своего движения и превращают ее в хаотическое тепловое движение молекул. Если говорить обобщенно, полная механическая энергия (потенциальная + кинетическая) в них убывает, переходя в другие формы энергии, которые в конечном итоге переходят в тепловую. Такие системы принято называть диссипативными системами, сам процесс рассеяния энергии называют диссипацией.

Иногда поток подводимой к системе энергии может достигнуть такой интенсивности, что старый механизм диссипации уже не может справиться с ним. Системе грозит разрушение. Тогда она производит внутреннюю перестройку своих элементов таким образом, чтобы процесс рассеяния энергии пошел бы более интенсивно. Такая внутренняя перестройка приводит к образованию диссипативных структур, т.е. структур, сформированных с целью более интенсивного рассеяния энергии, подводимой в систему.

Диссипативные структуры, как правило, высокоупорядоченны. Они отличаются от равновесных структур тем, что для своего существования они требуют постоянного притока энергии извне. Очевидно, что диссипативные структуры могут формироваться лишь в диссипативных системах, находящихся в критических условиях. Переход диссипативной системы в упорядоченное состояние связан с неустойчивостью предыдущего, неупорядоченного. При этом определенный параметр системы превышает критическое значение. С переходом в новое структурное состояние система приобретает новый способ функционирования, обеспечивающий ее устойчивость в новом состоянии.

Во всех случаях перехода различных систем к новому устойчивому состоянию четко выделяется какой-либо параметр. Превышение критического значения этого параметра и приводит к формированию диссипативных структур и включению нового механизма диссипации энергии системы.

Воздействие нагрузки на материал приводит к непрерывному увеличению в нем плотности дислокаций  $r$  по сравнению с их начальной плотностью  $r_0$ . Наконец, наступает такой момент, когда плотность дислокаций достигает критической величины  $r_{кр}$ , после чего уже невозможна упругая деформация материала. Теперь при снятии нагрузки образец материала не вернется к первоначальной форме и размерам — он останется слегка деформированным. Деформация при этом необратима, т.е. остается после снятия нагрузки, ее называют пластической деформацией.

Природные материалы изначально неоднородны. Они разбиты на отдельные области, которые называют элементами структуры или структурными элементами. При этом одновременно присутствует несколько уровней структуры. Элементы более низкого уровня являются «строительными кирпичиками» для элементов более высокого уровня. Такой порядок построения называют иерархическим. Созда-

ние и разрушение — взаимнообратные процессы, поэтому механизмы разрушения материалов закладываются в процессе их формирования. Это очевидно для любых механических систем. В соответствии с этим принципом многоуровневая структура природных материалов предполагает многоуровневость и многостадийность процессов их разрушения.

Концентрация дислокаций является параметром, управляющим поведением материалов под нагрузкой. Пластическая деформация начинается в тот момент, когда дислокаций становится настолько много, что расстояние между ними снижается до критического значения, ниже которого они начинают активно взаимодействовать между собой. Так начинают проявляться коллективные эффекты.

Аморфная структура, возникающая при накоплении еще большей концентрации дислокаций, — это насыщенная дислокациями до определенного критического значения рыхлая зона. Материал этой зоны неплотно заполняет занимаемый им объем, поэтому с точки зрения теории фракталов зона может описываться как фрактальная, обладающая дробной размерностью. Ее возникновение неизбежно предшествует образованию любых поверхностей. Возникновение микротрещин является именно процессом образования двух новых двумерных поверхностей на месте бывшего трехмерного объема. Это невозможно без предварительного формирования зоны перехода между существовавшей размерностью и вновь возникающей размерностью.

В ней велико значение энергии дислокаций  $W$ , причем чем выше плотность дислокаций, тем больше их энергия  $W$  и меньше значение фрактальной размерности  $D_{Fi}$  материала зоны. Фрактальная размерность по толщине переходной зоны изменяется от 3 к 2. Поэтому поверхностная энергия  $\Pi$  может быть найдена как интегральная разность между размерностью окружающего пространства и фрактальной размерностью материала переходной зоны:

$$\Pi = \int_{i=2}^3 k(D - D_{Fi}), \quad (8)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $D$  — размерность окружающего пространства ( $D = 3$ );  $D_{Fi}$  — фрактальная размерность  $i$ -го слоя в переходной зоне от размерности 2 к размерности 3.

Латентный (скрытый) процесс, который описывает зарождение трещины, является процессом подготовки такой переходной зоны. Граничные зоны структурных элементов поликристаллических материалов коренным образом отличаются от их внутренних областей. Перестройка объемной части структурных элементов поликристаллических тел в наиболее энергетически выгодную упорядоченную структуру в процессе посткристаллизации сопровождается выделением скрытой теплоты кристаллизации, которая диссипирует через поверхностные слои структурного элемента и обуславливает, таким образом, необходимость формирования фрактальных диссипативных структур в поверхностных переходных слоях конденсированных сред.

Переходным поверхностным слоем называется зона, расположенная непосредственно от поверхности вглубь материала на некоторую толщину  $d$ . Фрактальная размерность структур переходного слоя убывает от значения  $D = 3$  около объемной части структурного элемента до  $D = 2$  на его поверхности. Переходный поверхностный слой является объектом, обладающим совокупностью фрактальных размерностей в распределении геометрических, энергетических, химических и других свойств. При этом численные значения фрактальных размерностей структур переходного слоя характеризуют степень заполнения веществом слоя трехмерного пространства.

С помощью концепции переходного поверхностного слоя становится понятной природа поверхностной энергии твердых тел. В классических представлениях феномен поверхностной энергии, определяющий устойчивость какой-либо поверхности раздела, связывают с некоторым избытком свободной энергии на границе раздела — свободной поверхностной энергией  $F_s$ , пропорциональной площади поверхности раздела фаз  $S$ :

$$F_s = (dF / DS)S = \sigma S, \quad (9)$$

где  $\sigma$  — удельная свободная поверхностная энергия, приходящаяся на единицу поверхности раздела фаз, называемая поверхностным натяжением твердого тела.

Для жидкостей поверхностная энергия и поверхностное натяжение совпадают, для твердых тел — нет. Для жидкостей разработано большое количество методов определения поверхностного натяжения. Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления [4]. Недавно предложено три метода экспериментального определения поверхностного натяжения твердых тел — диэлектриков и магнитных материалов [5—7].

Реальные сплавы и природные материалы представляют собой сверхсложные структуры, для адекватного описания которых недостаточно одной лишь величины фрактальной размерности, поэтому здесь требуется привлечение концепции мультифракталов. Например, фрактальные поверхности, подобные поверхностям разлома минерала, должны характеризоваться различными законами подобия в плоскости разлома и поперек нее. Мультифрактал можно получить, если «что-то сделать» с фракталом, например, населить его блуждающими частицами. Тем самым на нем распределяется некая новая мера. Вес каждого узла фрактального объекта уже не равен единице, а зависит от того, что теперь распределено на фрактале: сколько раз на узел попала блуждающая частица. Таким образом, появляется бесконечная иерархия критических показателей. Основная идея при описании мультифракталов состоит в том, чтобы объекты со сложной топологией характеризовать не только масштабом, но и вероятностью события, происходящего в данной области масштаба. Внутренняя структура самого переходного слоя является достаточно сложной (рис. 2).

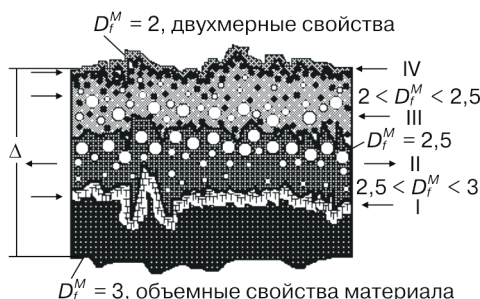


Рис. 2. Схема строения переходного поверхностного слоя на границе металл—газ

На рисунке стрелками отмечены зоны, подверженные сжимающим (стрелки направлены навстречу друг другу) и растягивающим (стрелки направлены в противоположные стороны) напряжениям.  $D_f^M$  — фрактальная размерность вещества матрицы, которое образует структуры поверхностного переходного слоя. Это связано с его функциональностью.

Структура переходного слоя включает в себя условно несколько подповерхностных зон и мономолекулярный стехиометричный слой на границе контакта фаз.

При переходе непосредственно от однородного распределения свойств в объемной части кристаллического тела ( $D = 5$ ) наблюдается массовый выход дислокаций и формируется первая подповерхностная зона I с повышенной плотностью данных линейных дефектов (см. рис. 2). В этой зоне осуществляется самоорганизация дислокационных скоплений в замкнутые ячеистые, спиральные или другие структуры. Сжимающие напряжения в ней обеспечивают сохранение формы и свойств граничащей с ней объемной фазы, которая простирается вглубь объекта.

Следующая зона II (см. рис. 2), расположенная в сторону вышележащих подповерхностных зон переходного слоя, имеет рыхлую, пористую структуру, связанную с обрывом большого количества дислокаций в нижележащей зоне. Она может быть описана как губка Менгера. В ней реализуются растягивающие напряжения. Фрактальная размерность заполнения веществом материала трехмерного пространства в данной зоне принимает значения в интервале  $3 > D_f^M > 2,5$ .

Понижение фрактальной размерности и плотности вещества происходит за счет роста количества вакансий и пор в данной зоне переходного слоя.

Зона III (см. рис. 2), граничащая в своей нижней части с насыщенной вакансиями второй зоной — структурой типа губки Менгера — характеризуется присутствием в ней частиц обеих объемных фаз.

Если частицы контактирующих фаз могут образовывать стехиометрические соединения, то на границе переходного слоя образуется мономолекулярный слой зоны IV (см. рис. 2). Он также включает в себя частицы обеих объемных фаз, но характеризуется стехиометричностью, которая, однако, имеет место лишь в плоскости слоя. Это обуславливает и объясняет наличие сингулярности (скачка) свойств на некоторых твердых поверхностях. Поэтому говорим о размерности распределения физико-химических свойств в данном слое  $D = 3$ .

Согласно классическому определению, термодинамическое равновесие — это равенство потоков энергии между системой и окружающей средой. Оно всегда

реализуется через поверхность раздела. Учитывая это, можно утверждать, что поверхностный слой непосредственно участвует в диссипации энергии системой и является диссипативной структурой. Как диссипативная структура, поверхность обладает следующими свойствами: временем жизни определенного структурного состояния, которое зависит от внешних условий, областью локализации и фрактальной размерностью. Обеспечивая термодинамическое равновесие объемной части тела с окружающей средой, поверхностный слой по сути своей является принципиально неравновесной структурированной системой и относится к числу открытых систем.

Через поверхностный слой осуществляется постоянный приток энергии извне. Поэтому энергетический поток играет роль потока информации, на который поверхностный слой реагирует процессом самоорганизации структуры.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Адушкин В.В., Стивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. — М., Недра, 1993.
- [2] Воробьев А.Е., Портнов В.С., Турсунбаева А.К., Маусымбаева А.Д., Юров В.М. Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых. — Караганда (Казахстан): Издательско-полиграфический центр Казахстанско-Российского университета, 2010.
- [3] Вильсон А.Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. — М.: Наука, 1978.
- [4] Александров Е.А., Боголепов В.П. О некоторых организационных критериях качества функционирования систем (к вопросу о создании математического аппарата теории организации) // Организация и управление. — М.: Наука, 1968.
- [5] Бубнов В.К., Спиринов Э.К., Капканциков А.М., Воробьев А.Е. и др. Теория и практика добычи полезных ископаемых для комбинированных способов выщелачивания. — Целиноград (Казахстан): Жана-Арка, 1992.
- [6] Бубнов В.К., Чантурия В.А., Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Шибяев А.П. Способ кучного электрохимического выщелачивания руд: Патент 2062869 РФ, МПК<sup>6</sup> E 21 B 43/28, БИ № 18, 1996.
- [7] Буллах А.Г., Буллах К.Г. Физико-химические свойства минералов и компонентов гидротермальных растворов. — М.: Недра, 1978.

## NATURAL LEACHING OF URANIUM AND THE MECHANISM OF DESTRUCTION OF THE ORE BODIES AND ROCKS

A.E. Vorobiev<sup>1</sup>, T.V. Chekushina<sup>2</sup>, I.V. Sokolov<sup>1</sup>,  
E.V. Chekushina<sup>1</sup>, Zh.Yu. Abdulatipov<sup>1</sup>, A.V. Sinchenko<sup>1</sup>, A. Roman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of petroleum geology, mining and oil and gas business  
Engineering faculty

Peoples' Friendship University of Russia  
Ordzhonikindze str., 3, Moscow, Russia, 115419

<sup>2</sup>Research Institute of Comprehensive Exploitation  
of Mineral Resources Russian Academy of Sciences  
Kryukovskiy tupik, 4, Moscow, Russia, 111020

Leaching of the metal begins after the filing of a working solution to the array and ends in a short time. The process of leaching in the microcracks is long, and the process of leaching in the mikropores is longer.

An important parameters of leaching of uranium are: the area of actively surface cultivating of minerals, which means a destruction of ores and rocks.

**Key words:** Natural leaching, destruction of solids, the transition surface layer, metal, energy, the crack.