© С.Б. Татауров, 2007

УДК 622. 234.42

С.Б. Татауров

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРИОГЕНЕЗА НА РУДОПОДГОТОВКУ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Семинар № 25

Начиная с середины XX века российскими и зарубежными учеными уделяется большое внимание развитию технологий кучного выщелачивания цветных благородных металлов на территории криолитозоны. Эти технологии базируются на работах И.Н. Плаксина, В.А. Чантурия, Д.М. Юхтанова, А.П. Зефирова, М.А. Кожуховой, В.Ж. Аренса, В.М. Авдохина, В.В. Лодейщикова, С.И. Полькина, Г.Г. Минеева, А.С. Черняка, В.А. Бочарова и др. В их основе заложены физические и физико-химические методы интенсификации кучного выщелачивания цветных и благородных металлов. В тоже время применение технологий кучного выщелачивания цветных и благородных металлов в криолитозоне требует значительных энергетических затрат на рудоподготовку и сохранение температурного режима минерального сырья при извлечении ценных компонентов.

Использование криогенеза может иметь высокое практическое значение для повышения селективности разрушения руды и снижения энергозатрат. Известно, что при переработке минерального сырья около 70 % энергии затрачивается на процессы дезинтеграции. Кроме того, использование традиционных методов дробления вызывает увеличение количества мелких и тонких частиц. Особенно эта проблема актуальна при рудоподготовке минерального сырья для кучного выщелачивания. В настоящее время эта проблема успешно решается в научно-исследовательских организациях ИПКОН РАН, ИРЭ РАН, ЦНИГРИ Минприроды РФ и других, путем создания каналов пробоя при направленном воздействии мощных электромагнитных импульсов или воздействием энергии ускоренных электронов на рудное сырье. Эти методы позволяют достичь селективной дезинтеграции руды без ее нагрева, снизить энергозатраты в 3-5 раза, и повысить извлечени благородных металлов в продуктивные растворы на 25-30 % [8]. Однако поиск новых дешевых ресурсосберегающих методов разрушения руды продолжает оставаться наиболее актуальным. Поэтому разработка и создание новых методов селективной дезинтеграции руды при помощи естественных энергетических импульсов (криогенеза) в условиях криолитозоны чрезвычайно актуально для повышения эффективности рудоподготовки и переработки методом кучного выщелачивания благородных металлов в криолитозоне.

Криогенез как естественный фактор энергетического воздействия на горные породы является в своем роде преобразователем солнечной энергии в механическую дезинтеграцию горных пород. По своей природе криогенез трансформируют поток тепловой энергии в дискретные тепловые колебания, разрушающие горные породы. Как свидетельствуют результаты исследований в ус-

ловиях криогенеза деструкция горных пород возрастает в несколько тысяч раз [9]. Эти процессы можно сравнить с биохимическим выщелачиванием вещества, когда при бактериальном выщелачивании, окисление сульфидных руд при помощи микроорганизмов (донорно-акцепторный механизм) происходит более чем в тысячу раз быстрее, чем в обычных условиях. Это еще раз подчеркивает, что в природе существуют практически неограниченные источники энергии, знание природы, механизмов и закономерностей которых позволит значительно сократить использование искусственных энергоисточников в освоении природных богатств и решить проблемы экологической безопасности при хозяйственном освоении Земли.

Лучистая энергия Солнца, перехватываемая Землей составляет $5{,}65 \cdot 10^{24}$ Дж/год. Кроме солнечной энергии получаемой из вне, тепловое состояние на поверхности Земли определяет энергия звезд ($22{,}61 \cdot 10^{24}$ Дж/год), корпускулярное излучение Солнца ($7{,}95 \cdot 10^{17}$ Дж/год), космические лучи ($5{,}02 \cdot 10^{17}$ Дж/год), гравитационное воздействие Луны и Солнца ($0{,}16 \cdot 10^{21}$ Дж/год) и т.д. Внешнее энергетическое воздействие на по-верхность Земли приблизительно на четыре порядка (или в 10 000 раз) больше воздействия внутренних источников энергии [3].

Баланс солнечной энергии на поверхности Земли по своей сути является законом сохранения энергии и записывается следующим образом [3]

$$R = Q_{сум}(1 - \alpha) - I \qquad (1)$$

где $Q_{сум}$ – суммарная коротковолновая радиация солнца и неба, Дж/м^2·год; α - альбедо земной поверхности, %; I – эффективное длинноволновое излучение, Дж/м^2; R – остаточная радиация (радиационный баланс), Дж/м^2·год

Для различных широт в пределах нашей страны среднеширотная величина радиационного баланса земной поверхности, равная разности поглощенной радиации и эффективного излучения изменяется от $16{,}7 \cdot 10^8$ Дж/м^2·год (52° северной широты) до $9{,}5 \cdot 10^8$ Дж/м^2·год (68° северной широты) [4].

Интенсивность воздействия криогенеза на состав, строение и свойства минерального сырья определяется изменением термодинамических условий в пространстве и во времени. Рассматривая золотосодержащее сырье как геосистему, следует выделить внешние и внутренние факторы, влияющие на перестройку ее структуры, состава, строение и технологических свойств минерального сырья.

К климатическим (внешним) факторам относятся среднегодовая температура (t_0) и амплитуда температур воздуха (A_0), среднегодовая температура ($t_{ср}$) и амплитуда температур ($A_{ср}$) на поверхности пород, количество циклов замерзания и оттаивания на поверхности пород ($n_{ЦЗО}$), количество осадков в твердом ($Q_{ос.т.}$) и жидком виде ($Q_{ос.ж.}$), период колебаний температур воздуха (T_τ) (суточный, сезонный, годовой, короткопериодный, среднепериодный, длиннопериодный).

Основной закономерностью учитывающей распространение температурных волн в рудной массе без учета фазовых переходов служит формула Фурье [4]

$$t(z,\tau) = t_o + Ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z} Sin(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z)$$

(2)

где t_o – средняя температура за период колебаний, $\omega = 2\pi / T$ - частота, A – амплитуда колебаний температуры на поверхности руды, а – коэффициент тем-

пературопроводности, м^2/с, T – период, z – мощность руды, м.

Наиболее подверженным воздействию криогенеза является слой руды мощностью до 10-20 м. В него входит слой суточных ($h_{сут}$ =), сезонных ($h = \xi$ =1…5, м) и годовых колебаний температур (h = 10…20 м). Хотя как свидетельствуют результаты исследований, многолетнемерзлые горные породы, находящиеся ниже годовых колебаний температур, не могут рассматриваться как стабильная минеральная система [9].

К внутренним факторам относится вещественный состав минерального сырья, строение и свойства минералов и руд, термодинамические параметры и физико-химические свойства среды (T, P, V, pH, Eh и т.д.), растворимость, теплообмен, массообмен и т.д. Их наложение в пространстве и во времени сопровождается развитием физических и физико-химических процессов в минеральном сырье – градиенты температур, тепловое расширение, скорость релаксации напряжений, поля физических напряжений, термодинамические условия промерзания, тепло экзотермических реакций, расклинивающее действие адсорбционных пленок и свободной воды и т.д.

В связи с тем, что горные породы являются многокомпонентными гетерогенными системами, термодинамические процессы, протекающие в них, имеют ряд своих специфических особенностей. Это явления, происходящие как в самих минералах, так и на границах между ними (физические и физико-химические процессы на границах и внутри минеральных зерен, трещин, теплообмен и т.д.). При криогенезе особое место занимает вода, находящаяся в руде в виде свободной фазы, адсорбционных пленок и т.д., так как изменение ее свойств наиболее контрастно при динамических колебаниях температур в области положительных и отрицательных ее значений на фоне физических и физико-химических свойств минералов входящих в состав руды.

Принципиально воздействие криогенеза на кусок руды можно описать в следующем виде (рис. 1).

В зависимости от климатических условий, характеризующихся внешними факторами: среднегодовой температурой и амплитудой температуры воздуха, среднегодовой температурой и амплитудой температур на поверхности пород, количеством циклов замерзания и оттаивания на поверхности пород, количеством осадков в твердом и жидком виде, периодом колебаний температур воздуха над куском руды, происходит работа за счет преобразования солнечной энергии в механическую. Количественно внешняя работа dA над дезинтеграцией куска руды в условиях криогенеза может быть представлена при помощи элементарного теплового процесса с позиции первого начала термодинамики

$$dA = dU - dQ \qquad (3)$$

где dU – часть тепла, превратившаяся во внутреннюю энергию нагреваемого куска руды; dQ – количество тепловой энергии, образовавшейяся вследствие поглощения лучистой энергии

Динамичность процесса криогенеза обуславливают суточные, сезонные и годовые колебания температур окружающей среды которые приводят к непрерывным преобразованиям различных видов энергии (тепловой, механической, химической и т.д.). Состояние термодинамической системы (рудной массы) на входе определяется внешними факторами криолитозоны,

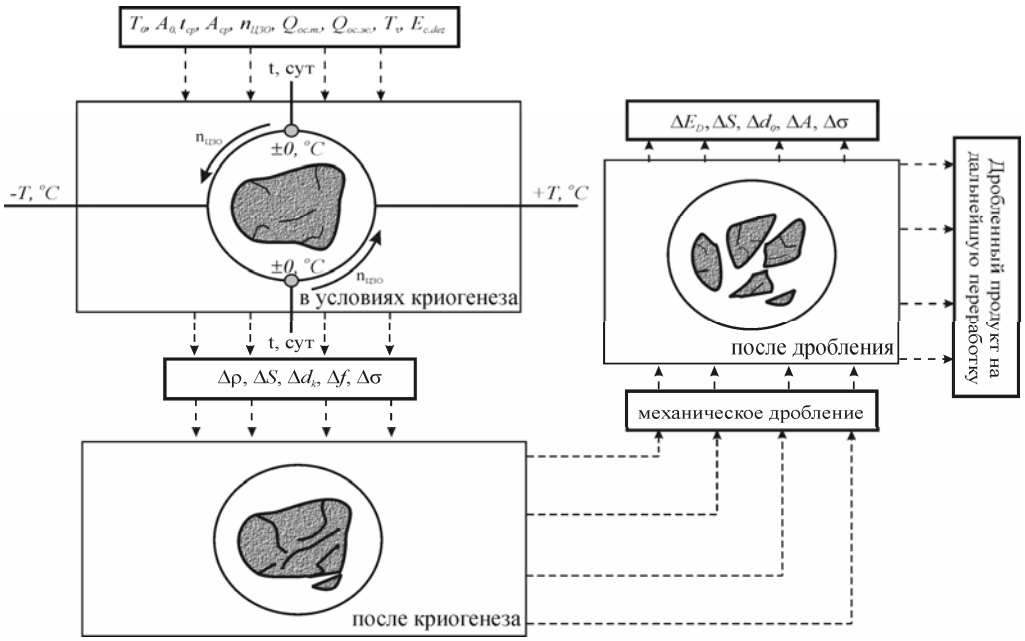

Рис. 1. Принципиальная схема дезинтеграции куска руды в условиях криогенеза и механического дробления: t_0, A_0, $t_{ср}$, $A_{ср}$, $N_{ЦЗО}$, $Q_{ос.т.}$, $Q_{ос.ж.}$, T_τ- соответственно среднегодовая температура и амплитуда температур воздуха, среднегодовая температура и амплитуда температур на поверхности пород, количество циклов замерзания и оттаивания на поверхности пород, количество осадков в твердом и жидком виде, период колебаний температур воздуха (τ – суточный (24 ч), сезонный *(0°C<t< 0°C)*, годовой)

следствием которых является циклическое промерзание-оттаивание руды. В результате происходит физическая дезинтеграция горных пород с образованием микротрещин, что приводит к изменению физического состояния руды на выходе системы выражающегося в изменении плотности, площади свободной поверхности, дисперсности (размера кусков), пористости и крепости руды, удельной свободной энергии за счет температурного механизма (объемно-градиентных напряжений в горных породах развивающихся на минеральном уровне), а также криогидратационного и гидратационного механизмов с участием расклинивающих действий льда и адсорбционных пленок воды. В момент образования льда (при отсутствии возможности расширения) давление в порах может достигать порядка 2100 кг/см^2 [6]. Эффективность дезинтеграции горной породы при воздействии криогенеза зависит от условий, при которых развивается криогенез – аэральных, аквальных и нивальных, а также от количества циклов промерзания-оттаивания (ЦПО) [9].

Как свидетельствуют результаты исследований, наибольший эффект гидратационного механизма наблюдается в условиях циклического промерзания и оттаивания горных пород [2]. В своих работах В.Н. Конищев (1981) выделяет зональный вариант данного механизма, который называет криогидратационным. Согласно его исследованиям этот механизм наиболее активно протекает в слое

Изменение V-индекса горных пород (изменение относительной дезинтеграции горных пород) от количества ЦЗО при различных условиях криогенеза [10]

Генетический тип месторождений	**Вмещающие породы**	**Уравнения связи и условия криогенеза**					
		$\Delta k_{d.i} = a + be^{(-n/c)}$ **(аэральный)**					
Магматический	Граниты (PR_1nm), габброннориты (PR_1cnm),	*a*	*b*	*c*		*R*	
		2.65	-2.67	78.62		0.98	
Метаморфический	Сланцы (PR_3au): филлитовидные, глинистые	1.42	-1.52	96.8		0.92	
		$\Delta k_{d.i} = a + be^{(-n/c)}$ (аквальный)					
Магматический	Граниты (PR_2km)	*A*	*b*	*c*		*R*	
		2.65	-2.67	78.62		0.98	
Метаморфический	Сланцы (PR_3au): филлитовидные, глинистые	1.42	-1.52	96.8		0.92	
		$\Delta k_{d.i} = a + be^{(-n/c)} + de^{(n/y)}$ (ТУ+АК)					
Магматический	Граниты (PR_1nm), габброннориты (PR_1cnm)	*a*	*b*	*c*	*d*	*y*	*R*
		0	23.5	-70.2	-24.2	$41.0 \cdot 10^3$	0.99
Метаморфический	Сланцы (PR_3au): филлитовидные, глинистые	0	186.2	-51.9	-186	$1.1 \cdot 10^{137}$	1

Примечание: *a, b, c, d, y* – расчетные коэффициенты; *n* – количество ЦЗО; *R* – коэффициент корреляции; *ТУ+АК* – условие криогенеза при совместном действии на руды теплового удара с последующим циклическим промерзанием и оттаиванием в аквальных условиях

сезонных колебаний температур, в диапазоне температур горных пород близких к 0 °С. Это он объясняет тем, что при этих температурах расклинивающее действие воды в микротрещинах достигает наибольшей силы, а при промерзании вследствие подтягивания влаги из микротрещин к кристаллам льда она падает. Действие гидратационного механизма на дезинтеграцию горных пород обуславливает расклинивающее действие тонких пленок воды, адсорбированных на стенках микротрещин, размером от нескольких микрон до тончайших дефектов кристаллов молекулярного размера [1, 6 и др.]. Расклинивающее давление таких пленок в двухмерном пространстве может достигать от 1 до 100 кгс/см^2.

В результате после воздействия криогенеза наблюдается снижение крепости руд и увеличение их открытой пористости, что приводит к снижению потребляемой энергии затрачиваемой на рудоподготовку, и увеличению скорости выщелачивания руды.

Изменение удельного расхода энергии требуемой на достижение одинаковых относительных изменений крупности в единицу объема материала после воздействия криогенеза рассчитывается из равенства

$$E_S = E_D - E_{c.dez}, \qquad (4)$$

где E_D – удельный расход энергии затрачиваемой на дробление руды,

кВт·ч/т; $E_{c.dez}$ – удельный расход естественных энергетических воздейс-твий, затрачиваемых на дезинтеграцию руды в условиях криогенеза, кВт·ч/т.

Удельный расход энергии затрачиваемой на дробление руды найдем при помощи уравнения Бонда [7]

$$E_D = 10^{-2} W(\sqrt{d_k} - \sqrt{d_o}) / \sqrt{d_k \cdot d_0}, \qquad (5)$$

где W – индекс работу по Бонду (для золотосодержащей руды равен 16,5 кВт·ч/т (для ρ = 2810 кг/м^3); d_k – исходный размер кусков руды, м; d_o –размер кусков руды после дробления, м.

Удельный расход естественных энергетических воздействий $E_{c.dez}$ затрачиваемых на дезинтеграцию руды в условиях криогенеза найдем при помощи уравнения энергии дезинтеграции горных пород при их выветривании [5]

$$E_{c.dez} = \omega \Delta V + \sigma \Delta S, \qquad (6)$$

где ω - удельная объемная энергия, Дж/м^3, σ - удельная поверхностная энергия, Дж/м^2; V – объем, м^3; S – площадь свободной поверхности, м^2

Разрушение горных пород различного генезиса, состава, строения и свойств подчиняется известной зависимости полученной В.Н. Конищевым (1981) для определения показателя относительной устойчивости $H_{кр}$ гранулометрической фракции мономинерального состава

$$H_{кр} = \frac{a-b}{a \cdot n}, \qquad (7)$$

где a – количество гранулометрической мономинеральной фракции в образце или породе до воздействия на нее криогенных факторов; b – количество той же фракции после воздействия; n – число циклов промерзания и оттаивания

Учитывая, что $\frac{a-b}{a}$ соответствует своему значению для каждого генетического типа мономинеральных фракций, то для и горных пород

$$\frac{a-b}{a} = k_i \qquad (8)$$

Для горных пород показатель относительной дезинтеграции $k_{c.dez.i}$ равен [12]

$$k_{c.dez.i} = \frac{k_i}{n} \qquad (9)$$

где k_i – коэффициент пропорциональности, учитывающий условия криогенной дезинтеграции каждого конкретного петрографического типа горных пород

Из условия, что криогенная дезинтеграция горных пород есть изменение массы куска руды за определенное количество циклического промерзания-оттаивания, то можно записать, что $k_i = \Delta k_{d.i}$ – изменение массы куска руды, кг, который можно назвать V–индексом

$$\Delta k_{d.i} = k_{c.dez.i} \cdot n, \qquad (10)$$

Уравнение (4) с учетом воздействия количества циклов промерзания-оттаивания и петрографического состава руды примет вид

$$E_{dez} = \omega \frac{\Delta k_{d.i}}{\Delta \rho} + \sigma \Delta S, \qquad (11)$$

В результате получим уравнение удельного расхода энергии требуемой на достижение одинаковых относительных изменений крупности в единицу объема материала после воздействия криогенеза

$$E_S = 10^{-2} W(\sqrt{d_k} - \sqrt{d_o}) / \sqrt{d_k \cdot d_0} - \frac{3.6 \cdot 10^6 \left(\omega \frac{\Delta k_{d.i}}{\Delta \rho} + \sigma \Delta S \right)}{m}. \qquad (12)$$

Теоретические и экспериментальные исследования, свидетельствуют, что изменения V-индекса горных пород (изменение относительной дезинтеграции горных пород) зависит в большей степе-

ни от петрографического состава и условий криогенеза (таблица).

Представленные значения *V*-ин-декса горных пород можно использовать для расчета удельного расхода энергии требуемой на достижение одинаковых относительных изменений крупности в единицу объема материала подверженному воздействию криогенеза.

Выводы

1. Предложена принципиальная схема дезинтеграции куска руды в условиях криогенеза для интенсификации рудоподготовки и переработки минерального сырья в условиях криолитозоны.

2. Получено уравнение удельного расхода энергии требуемой на достижение одинаковых относительных изменений крупности при дроблении в единицу объема материала после воздействия криогенеза.

3. Для расчетов удельного расхода энергии требуемой на достижение одинаковых относительных изменений крупности при дроблении в единицу объема материала подвергнутых воздействию криогенеза введено понятие *V*-индекса горных пород, который соответствует изменению относительной дезинтеграции горных пород в зависимости от количества циклов промерзания-от-таивания в различных условиях криогенеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дерягин Б.В.* Расклинивающее действие жидких пленок и его практическое значение. /Природа. №2. – 1943. – с. 23-32.
2. Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. – Новосибирск: Наука, 1981. – 198 с.
3. *Общее* мерзлотоведение (геокриология). /Изд.-во 2. переработанное и дополненное. Учебник. Под. Ред. В.А. Кудрявцева. // – М.: МГУ, 1978. – 464 с.
4. *Основы* мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: МГУ. 1974. 433 с.
5. *Тимофеев П.П., Щербаков А.В., Ильин В.А.* Энергетика гипергенеза. //Литология и полезные ископаемые. 1981. №4, с. 5-17.
6. *Тютюнов И.А.* Процессы изменения и преобразования почв и горных пород при отрицательной температуре (Криогенез). - М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 144 с.
7. Цыпин Е.Ф., Морозов Ю.П., Козин В.З. Моделирование обогатительных процессов и схем: Учебник. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 1996. – 368 с.
8. *Чантурия В.А.* Современные проблемы обогащения минерального сырья в России. //Электронный научно-информа-ционный журнал “Вестник ОГГГГН РАН”, № 4(6)'98, М.: ОИФЗ РАН, 1998.
9. *Шумилов Ю.В.* Континентальный литогенез и россыпеобразование в криолитозоне. / Ю.В. Шумилов. – Новосибирск: Наука, 1986. –176 с.
10. *Шестернев Д.М., Татауров С.Б.* Криогенез и ртутьсодержащие соединения в горнопромышленных отвалах. //Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 2003. – 178 с.
11. *Шестернев, Д.М.* Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. / Д.М. Шестернев. – Новосибирск: СО РАН, 2001. – 266 с.

Коротко об авторах

Татауров С.Б. – докторант, Московский государственный горный университет.