

УДК 622.765

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ
НА ДЕЗИНТЕГРАЦИЮ УПОРНЫХ РУД**

В. С. Портнов¹, В. М. Юров², А. Д. Маусымбаева¹

¹*Карагандинский государственный технический университет,
E-mail: aliya_maussym@mail.ru, ул. Бульвар Мира 56, 100000, г. Караганда, Казахстан*
²*Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова,
ул. Университетская, 28, 100028, г. Караганда, Казахстан*

Рассмотрены процессы дезинтеграции упорных руд с учетом поверхностных свойств горных пород и минералов. Предложены методы экспериментального определения поверхностного натяжения твердых тел при оценке работы диспергирования и методика расчета толщины поверхностного слоя минералов в процессе разрушения рудного материала. Приведены расчеты температуры плавления наночастиц, полученных при использовании нетрадиционных методов дезинтеграции упорных руд. Расчеты выполнены для наночастиц с возможным содержанием большинства металлов периодической системы элементов.

Дезинтеграция руд, минерал, поверхностное натяжение, толщина поверхностного слоя, температура плавления, наночастица

DOI: 10.15372/FTPRPI20180419

Самый энергоемкий и дорогостоящий процесс при добыче и обогащении минерального сырья — их разрушение (дробление и измельчение). Несмотря на давнюю историю исследования этого процесса, еще нет полной физической картины данного явления в целом. Это связано в первую очередь с многообразием элементарных актов разрушения. Подобно тому, как в физике твердого тела при интерпретации различных явлений пришлось вводить множество “онов” — фононов, поляронов, магнонов и т. д. — элементарных возбуждений, так и в физике разрушения после основополагающих работ С. Н. Журкова [1] появились элементарные носители разрушения — дилатоны, фрустроны и др. И если до недавнего времени при интерпретации процесса разрушения преобладали модельные представления, основанные на простых геометрических образах, предложенных Гриффитсом, Стро, Орованом и др., то сейчас предпринимаются попытки использования нелинейных методов для развития концепции разорванных связей, разрабатываются модели элементарных носителей разрушения, на макроскопическом уровне описания внедряются методы подобия и синергетический подход [2].

Исследования авторов работы [3] показали, что для максимального раскрытия вкрапленных минеральных комплексов полезного компонента, помимо традиционных способов дробления и измельчения, представляется перспективным применение немеханических способов разрушения, обеспечивающих дезинтеграцию минеральных компонентов по межфазным границам за счет образования микротрещин и каналов пробоя в результате энергетических воздействий [4].

Проведенный анализ выявил [4], что большинство нетрадиционных методов обладают следующими недостатками: высокими энергетическими затратами и капиталовложениями, избыточным нагревом обрабатываемого материала и некоторыми другими.

ТЕРМОДИНАМИКА ДРОБЛЕНИЯ РУДЫ

В [5] магнитные диполи, дефекты в минерале или поверхностном слое (дислокации, поры и т. д.) рассматриваются как система невзаимодействующих частиц, погруженная в термостат. Квантовые переходы, обусловленные взаимодействием дефектов с термостатом, будут диссипативными (с вероятностью P), в отличие от взаимодействия с внешним полем (с вероятностью F). Диссипативные процессы приводят к тому, что вторичное поле (отклик системы) всегда меньше первичного, вызывающего образование дефектов. В результате получено явное выражение для функции отклика подсистемы элементарных возбуждений при наложении внешнего поля любой природы.

Если в качестве функции отклика Φ из [5] взять эффективность дробления η , то после ее линеаризации получим:

$$\eta = \frac{kT}{C_1} \frac{A}{G^0} \bar{N}, \quad (1)$$

где A — энергия дробления, Дж; T — температура, К; G^0 — энергия Гиббса массивного образца минерала, кДж/моль; \bar{N} — среднее число элементарных носителей разрушения (пропорциональное числу дефектов), моль⁻¹; C_1 — постоянная; k — постоянная Больцмана, Дж/К.

Из (1) следует прямая пропорциональность η от числа элементарных носителей разрушения, от температуры, работы (энергии) разрушения и обратно пропорциональная зависимость от энергии Гиббса. Таким образом, чем больше энергия Гиббса минерала, тем большую энергию разрушения надо подвести для его дробления.

Золото-кварц-сульфидные месторождения Казахстана классифицируются как в высшей степени упорные руды. Для них характерен наиболее высокий коэффициент крепости, равный 23 (по шкале Протодьяконова). На этих месторождениях золото преимущественно связано с пиритом и арсенопиритом, формируя комплексные золотосодержащие массивные пирит-халькопиритовые, пирит-халькопирит-сфалерит-галенитовые руды.

Ниже представлены данные по энергии Гиббса основных золотосодержащих минералов [6], где принято $G^0 \approx |-\Delta G^0|$, кДж/моль: галенит — 3 132; арсенопирит — 109 500; висмутин — 152 900; пирит — 162 000; халькопирит — 178 490; сфалерит — 203 570; гематит — 741 700; кварц — 855 690. Действительно, согласно (1), эффективность дробления золото-кварц-сульфидных руд значительно ниже, чем пирит-халькопиритовых. Поэтому большинство месторождений упорных руд (их в Казахстане около 65 %) пока не разрабатываются.

Полученная формула (1) объясняет явление селективного дробления горных пород и руд. Это связано с тем, что энергия Гиббса в большинстве случаев является величиной аддитивной:

$$G^0 = X_1 G_1^0 + X_2 G_2^0 + \dots + X_n G_n^0 = \sum_{i=1}^n X_i G_i^0, \quad (2)$$

где X_i — количество i -го компонента в руде, в долях; G_i — энергия Гиббса, кДж/моль.

В соответствии с этим формулы (1) и (2) дают распределение дробленой руды по размерам в зависимости от минерального состава руды.

РАБОТА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ МИНЕРАЛОВ

В простейшем случае работа диспергирования твердого тела равна

$$A = \sigma S, \quad (3)$$

здесь σ — поверхностное натяжение, Дж/м²; S — удельная поверхность твердого тела, м² [7].

При дроблении и измельчении величина S возрастает, так что эффективность использования поверхностно-активных веществ (ПАВ) в процессе дробления будет определяться изменением σ . Это следует из известного эффекта Ребиндера [8]. Если уменьшение σ при использовании того или иного ПАВ незначительно и не компенсирует увеличения S , то применение ПАВ в процессе дробления будет неэффективным.

Формулы (1) и (3) показывают, что управлять процессами дробления и измельчения можно тогда, когда будут в наличии измерения методов поверхностного натяжения твердых тел, включая горные породы и минералы.

Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел (в том числе и минералов) затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение чистых металлов при температурах, близких к точке плавления. Обзор экспериментальных методов определения поверхностного натяжения твердых тел приведен в [9]. Отмечается, что в настоящее время отсутствует метод, который можно использовать для определения поверхностного натяжения в твердой фазе для различных веществ в широком диапазоне температур. Каждый из методов ограничен либо температурой, либо величинами, которые экспериментально определяются с малой точностью. Для минералов методов определения поверхностного натяжения нет.

Результатами исследований, проведенными в [10], установлена зависимость между твердостью минералов по шкале Мооса и их поверхностной энергией. В этой шкале, в значительной степени условно, принята за основу поверхностная энергия галита (NaCl). Относительно нее определена поверхностная энергия других минералов по шкале твердости Мооса. При измельчении минералов до размеров, близких к молекулярным, работа диспергирования, отнесенная к единице вновь образованной поверхности (удельная поверхностная энергия), составляет $4 \cdot 10^{-4} - 2.7 \cdot 10^{-3}$ Дж/см². Из данных, приведенных в [7], следует, что удельная поверхностная энергия и работа диспергирования колеблются в широких пределах, это объясняет трудности определения σ , но единая закономерность возрастания поверхностной энергии с увеличением твердости минералов и степени их дисперсности прослеживается во всех случаях. Принятые в [7] значения σ сильно занижены и не согласуются с их имеющимися экспериментальными и теоретическими величинами. К тому же шкала Мооса слишком груба для классификации минералов по их прочностным характеристикам.

В [11, 12] предложены новые методы экспериментального определения поверхностного натяжения твердых тел, которые апробированы на различных материалах и дают неплохое согласование с другими методами и экспериментальными данными. В основе новых методов лежит закономерность, которая описывает зависимость физического свойства твердого тела от его размера:

$$A(r) = A_0 \left(1 - \frac{d}{r} \right), \quad (4)$$

здесь A_0 — физическое свойство массивного образца; $A(r)$ — физическое свойство малой частицы или тонкой пленки размером r (нм); d — размерный фактор, нм. Для размерного фактора имеем формулу:

$$d = \frac{2\sigma v}{RT}, \quad (5)$$

где σ — поверхностное натяжение массивного образца, Дж/м²; v — молярный объем, м³/моль; R — газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура, К.

Из (5) вытекает линейная зависимость поверхностного натяжения от температуры с коэффициентом пропорциональности α :

$$\sigma = \alpha T. \quad (6)$$

Используя экспериментальные результаты для величины σ для золота, алюминия и ряда других металлов, получим, что при температуре, близкой к температуре плавления, величина поверхностного натяжения определяется формулой

$$\sigma = 10^{-3} T_m, \quad (7)$$

T_m — температура плавления металла, К.

В табл. 1 представлены результаты расчета σ по формуле (7) для ряда металлов.

ТАБЛИЦА 1. Поверхностное натяжение ряда металлов периодической системы элементов вблизи температуры плавления

Металл	σ , Дж/м ²	Металл	σ , Дж/м ²	Металл	σ , Дж/м ²	Металл	σ , Дж/м ²
Li	0.452	Al	0.933	Cu	1.056	Re	3.423
Na	0.371	Ga	0.303	Ag	0.934	Fe	1.808
K	0.337	In	0.429	Au	1.036	Co	1.763
Rb	0.312	Tl	0.576	Zn	0.693	Ni	1.726
Cs	0.302	Si	1.686	Cd	0.594	Ce	1.077
Be	1.558	Ge	1.231	Cr	2.173	Pr	1.208
Mg	0.923	Sn	0.505	Mo	2.873	Nd	1.298
Ca	1.118	Pb	0.600	W	3.673	Sm	1.325
Sr	1.030	Se	0.493	Mn	1.517	Eu	1.175
Ba	0.983	Te	0.725	Tc	2.473	Gd	1.585

Для минералов наиболее удобен способ определения поверхностного натяжения, описанный в [5], поскольку большинство минералов представляют собой диэлектрики или полупроводники и хорошо люминесцируют при облучении ультрафиолетовым светом или рентгеновскими квантами.

Зависимость интенсивности рентгенолюминесценции диэлектрика от размера его частиц описывается формулой типа (4):

$$I = \text{const} \left(1 - \frac{d}{r} \right), \quad (8)$$

где I — интенсивность рентгенолюминесценции, отн. ед.; r — радиус частицы диэлектрика, мкм [5]. Параметр d связан с поверхностным натяжением σ формулой (5).

В координатах $I \sim 1/r$ зависимость (8) прямая линия, тангенс угла наклона которой определяет d , и по (5) рассчитывается поверхностное натяжение диэлектрика σ . Способ применялся для определения поверхностного натяжения диэлектрических кристаллов КС1 и ряда щелоч-

но-галогидных соединений. Интенсивность люминесценции фиксировалась стандартным фотоэлектрическим методом. Размер зерна диэлектрика устанавливался с помощью металлографических микроскопов “Эпиквант” или МИМ-8.

По зависимости (8) для KCl при температуре 300 К получено значение размерного фактора 0.01 мкм. Для KCl молярный объем равен 37.63 см³/моль, и из (5) для поверхностного натяжения получено значение 0.143 Дж/м².

Для некоторых галогенидов металлов использовались три метода определения поверхностного натяжения, описанные в [11, 12]. Во всех трех методах различия значений не превышали 2–3 %. Это дает уверенность в надежности предложенных методов определения поверхностного натяжения твердых тел.

Анализ экспериментальных данных показал выполнение соотношения

$$\frac{\sigma_{Me}}{\sigma_{MeH}} = c = \text{const} , \quad (9)$$

где σ_{Me} , σ_{MeH} — поверхностное натяжение чистого металла и галогидного соединения металла, Дж/м².

Для хлоридов постоянная c равна 2.40, для бромидов — 2.75, для иодидов — 3.00. На основе полученных констант по (9) рассчитаны значения поверхностного натяжения для галогенидов различных металлов. В качестве примера соответствующие значения для галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов приведены в табл. 2. Для оксидов щелочных и щелочноземельных металлов значения σ даны в табл. 3.

ТАБЛИЦА 2. Поверхностное натяжение галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов

Соединение	σ , Дж/м ²	Соединение	σ , Дж/м ²	Соединение	σ , Дж/м ²
LiCl	0.205	RbI	0.104	RbBr	0.114
LiBr	0.200	CsCl	0.126	CaCl ₂	0.466
LiI	0.176	CsBr	0.110	CaBr ₂	0.407
NaCl	0.158	CsI	0.101	CaI ₂	0.373
NaBr	0.138	BeCl ₂	0.649	SrCl ₂	0.429
NaI	0.118	BeBr ₂	0.567	SrBr ₂	0.375
KCl	0.141	BeI ₂	0.519	BaCl ₂	0.410
KBr	0.123	MgCl ₂	0.385	BaBr ₂	0.358
KI	0.113	MgBr ₂	0.336	BaI ₂	0.328
RbCl	0.130	MgI ₂	0.308	—	—

ТАБЛИЦА 3. Поверхностное натяжение оксидов щелочных и щелочноземельных металлов

Соединение	σ , Дж/м ²	σ , Дж/м ² , $T=300$ К	Соединение	σ , Дж/м ²	σ , Дж/м ² , $T=300$ К
Li ₂ O	3.48	1.170	BeO	11.98	9.68
Na ₂ O	2.79	0.546	MgO	7.10	4.79
K ₂ O	2.59	0.285	CaO	8.60	6.29
Rb ₂ O	2.40	0.092	SrO	7.92	5.62
Cs ₂ O	2.32	0.015	BaO	7.56	5.25

Сопоставление табл. 1–3 показывает, что работа диспергирования в случае галогенидов металлов уменьшается примерно в 3 раза, а в случае оксидов металлов увеличивается почти в 7 раз. Это означает, что при малых содержаниях полезного компонента в руде необходимо использовать физико-химические способы дезинтеграции, например выщелачивание. Иными словами, требуется переводить чистые металлы, их окислы и сульфиды в легко перерабатываемую фракцию, например галогениды или сульфаты. Подобные методы все шире используются при добыче благородных, редкоземельных металлов, урана и других элементов [3].

ТОЛЩИНА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Разрушение твердого тела, так же как и его плавление, начинается с поверхностного слоя. Согласно современным представлениям, под поверхностной фазой понимают сверхтонкую пленку, находящуюся в равновесном состоянии с кристаллической подложкой, свойства, структура и состав которой отличны от объемных. Однако вопрос о толщине этой пленки для различных веществ до настоящего времени остается открытым. При r меньше d формула (4) преобразуется к виду:

$$A(r) = A_0 \left(1 - \frac{d}{d+r} \right). \quad (10)$$

Величину d назовем толщиной поверхностного слоя. Таким образом, используя соотношения (4), (10) и экспериментально найденные значения поверхностного натяжения, получим методику экспериментального определения толщины поверхностного слоя твердого тела. На основании (5) и данных табл. 1 можно определить толщину поверхностного слоя металла (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Толщина поверхностного слоя чистых металлов, нм

Металл	d	Металл	d	Металл	d	Металл	d	Металл	d	Металл	d	Металл	d
Li	1.4	Sr	8.3	Sn	2.0	Cd	1.9	Fe	3.1	Gd	7.6	Ac	7.1
Na	2.1	Ba	8.9	Pb	2.6	Hg	0.8	Co	2.8	Tb	7.5	Th	9.6
K	3.7	Al	2.2	Se	1.9	Cr	3.8	Ni	2.7	Dy	7.6	U	4.2
Rb	4.2	Ga	0.9	Te	3.5	Mo	6.5	Ce	5.4	Ho	7.8	Np	2.6
Cs	5.2	In	1.6	Cu	2.3	W	8.4	Pr	6.0	Er	7.8	Pu	2.7
Be	1.8	Tl	2.4	Ag	3.1	Mn	2.8	Nd	6.4	Tm	7.4	Am	6.4
Mg	3.1	Si	4.9	Au	3.3	Tc	5.1	Sm	6.3	Yb	6.5	Bk	5.2
Ca	7.0	Ge	4.0	Zn	1.5	Re	7.1	Eu	8.3	Lu	8.2	—	—

Из табл. 4 видно, что толщина поверхностного слоя чистых металлов не превышает 10 нм. Это означает, что поверхностный слой чистого металла представляет собой наноструктуру, физические свойства которой существенно отличаются от объемных свойств металла. Однако размерные эффекты начинают проявляться при толщине пленки металла около $10d$, так что к объемной фазе прилегает переходной слой этой толщины. Именно на этом масштабе происходят процессы разрушения твердого тела, а область масштабов относится к мезомеханике [13]. Физическая мезомеханика на сегодняшний день наиболее продвинутая теория, которая описывает процессы как предразрушения, так и разрушения твердого тела. Однако большинство параметров этой теории (включая поверхностный слой) экспериментально пока не определяются, что приводит к необходимости компьютерного моделирования большинства процессов

в твердом теле при его нагружении [13]. Изложенное для металлов справедливо и для других типов твердых тел, включая горные породы и минералы. Например, для оксидов металлов, как это следует из табл. 3 и формулы (5), толщина поверхностного слоя может составлять уже десятые доли, единицы микрометров и более.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ УПОРНЫХ РУД

В [14] проанализированы различные эффекты, возникающие при облучении горных пород и минералов потоками гамма-квантов, нейтронов, электронов с целью интенсификации извлечения определенных минералов. В [15] предлагаются механизмы воздействия импульсного электромагнитного излучения на тонкодисперсные рудные массы: образование каналов электрических пробоев матрицы минерала-хозяина и формирование зон наведенной трещиноватости вокруг каналов по мере их роста в минеральной среде; растрескивание минеральных агрегатов по причине возникновения термомеханических напряжений на границах срастания минеральных компонентов с различными тепло- и электрофизическими свойствами при локальном импульсном нагреве.

Воздействие на рудный материал высокоэнергетических импульсов электронов или электромагнитного излучения приводит к возрастанию числа дефектов в поверхностном слое, т. е. \bar{N} в (1), и к увеличению эффективности дробления и измельчения. Для корпускулярного излучения важную роль в дефектообразовании играет толщина поверхностного слоя. Если она значительно превышает длину пробега электронов в слое, то эффект от облучения минерала электронами будет незначительным.

Эффект от воздействия высокоэнергетических импульсов электромагнитного излучения будет заметным при наличии в рудном материале металлических ультрадисперсных частиц, которые при резком нагревании плавятся. Область, занятая испаренным веществом, образует полость взрыва, создавая большие термические напряжения и стимулируя трещинообразование. За пределами зоны испарения происходит раздавливание вещества, растрескивание минеральной матрицы в результате разрывных напряжений в окружном направлении [15]. Именно ее размер определяет дезинтеграцию минеральной частицы как составляющей рудного материала. Увеличение числа металлических ультрадисперсных частиц в минерале-хозяине приведет к увеличению суммарной зоны наведенной трещиноватости, пределом которой является объем разрушаемого рудного материала (куска). Размер зоны наведенной трещиноватости зависит от плотности энергии, давления газа в канале и упругих свойств вещества. Разупрочнение возможно вследствие образования микротрещин по причине возникновения термомеханических напряжений на границах срастания минералов с различными тепло- и электрофизическими свойствами при локальном импульсном нагреве. Согласно формуле Грюгенайзена, коэффициент термического расширения пропорционален теплоемкости. С учетом этого можно ожидать, что нанокристаллические материалы должны иметь более высокий коэффициент термического расширения. Такое предположение подтверждено исследованиями кристаллитов меди 8 нм и крупнозернистой меди. Коэффициент термического расширения в первом случае в 2 раза больше, чем крупнозернистой меди [16, 17]. Данная закономерность подтверждена в [18]. Увеличение количества ультратонких частиц в руде также приводит к росту трещинообразования.

Возможное понижение температуры плавления малых частиц с уменьшением их размера было высказано Дж. Томсоном в конце XIX в. В дальнейшем появилось большое число теоретических и экспериментальных работ, обзор которых приведен в [19].

В рамках настоящего подхода температура плавления малых частиц будет понижаться с уменьшением их размера по соотношению (10). В табл. 5 представлены результаты расчета температуры плавления частиц металлов T_m размером k (1, 10 и 50 нм) по формуле (10) с учетом данных табл. 4.

ТАБЛИЦА 5. Температура плавления наночастиц чистых металлов, К

Металл	T_0	$T_m,$ $k = 1$ нм	$T_m,$ $k = 10$ нм	$T_m,$ $k = 50$ нм	Металл	T_0	$T_m,$ $k = 1$ нм	$T_m,$ $k = 10$ нм	$T_m,$ $k = 50$ нм
Li	452	188.3	396.5	440.1	Au	1336	310.7	1 004.5	1 253.3
Na	371	119.7	306.6	356.1	Zn	693	277.2	602.6	672.8
K	337	71.7	246.1	314.1	Cd	594	204.8	499.2	572.3
Rb	312	60.0	219.7	287.7	Hg	234	127.7	216.1	230.2
Cs	302	48.7	198.7	273.6	Cr	2 173	452.7	1 574.6	2 019.5
Be	1 558	556.3	1 320.4	1 558	Mo	2 873	383.1	1 741.2	2 542.5
Mg	923	225.1	704.6	869.1	W	3 673	390.7	1 996.2	3 144.7
Ca	1 118	139.8	657.6	980.7	Mn	1 517	399.2	1 185.2	1 436.6
Sr	1 030	110.8	562.8	883.6	Tc	2 473	405.4	1 637.7	2 244.1
Ba	983	99.3	520.1	834.5	Re	3 423	422.6	2 001.8	2 997.4
Al	933	291.6	764.8	933.0	Fe	1 808	441.0	1 380.2	1 702.5
Ga	303	159.3	277.6	297.3	Co	1 763	464.0	1 377.3	1 670.0
In	429	165.0	369.8	415.7	Ni	1 726	466.5	1 359.1	1 637.6
Tl	576	169.4	464.5	549.6	Ce	1 077	168.3	699.4	972.0
Si	1 686	285.8	1 131.5	1 535.9	Pr	1 208	172.6	755.0	1 078.6
Ge	1 231	246.2	879.3	1 140.0	Nd	1 298	175.4	791.5	1 150.7
Sn	505	168.3	420.8	485.6	Sm	1 325	181.5	812.9	1 176.7
Pb	600	166.7	600.0	600.0	Eu	1 175	126.3	642.1	1 007.7
Se	493	170.0	414.3	475.0	Gd	1 585	184.3	900.6	1 376.0
Te	725	161.1	537.0	676.7	Tb	1 631	191.9	932.0	1 418.3
Cu	1 356	411.0	1 102.4	1 296.4	Dy	1 680	195.3	954.5	1 458.3
Ag	1 234	188.3	396.5	440.1	Ho	1 734	197.1	974.2	1 500.0

Из табл. 5 следует, что большинство наночастиц металлов размером 1 нм нестабильны при обычной температуре 300 К. Стабильными оказываются наночастицы бериллия, подгрупп меди, хрома, марганца и железа. Большинство наночастиц металлов размером 10 нм стабильны при обычных условиях, за исключением калия, рубидия, цезия и галлия. Для частиц размером 50 нм и выше температура плавления практически совпадает с температурой плавления массивного образца.

КРИОГЕННАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ УПОРНЫХ РУД

Метод криогенной дезинтеграции упорных руд появился сравнительно недавно и апробируется пока в режиме “промерзание – оттаивание” при кучном выщелачивании золота [20].

Из (3) и (6) следует, что работа диспергирования будет значительно уменьшаться с понижением температуры. В числителе (1) множитель kT компенсируется почти линейной зависимостью энергии Гиббса от температуры [6], так что в предельном случае имеем

$$A = \frac{C_2 G^0}{N} = \sigma TS. \quad (11)$$

Поскольку поверхностное натяжение также линейно зависит от температуры, работа диспергирования в общем случае будет квадратично убывать с понижением температуры. Это представляет собой значительный эффект при дезинтеграции упорных руд.

Примеры охлаждения рудной массы в процессе дробления неизвестны. Принципиальных ограничений использования криодезинтеграции упорных руд нет. При решении задачи охлаждения рудной массы криодезинтеграция упорных руд в процессе их дробления и измельчения может стать эффективным методом рудоподготовки.

ВЫВОДЫ

Предложенные методы определения поверхностного натяжения и работы диспергирования минералов, толщины их поверхностного слоя и температуры плавления наночастиц применимы при выборе параметров той или иной технологии дезинтеграции упорных руд. Полученные данные могут оказаться полезными и для наноразмерной технологической минералогии, перспективы развития которой только начинают обсуждаться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Журков С. Н.** Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46–52.
2. **Олемской А. И., Кацнельсон А. А.** Синергетика конденсированной среды. — М.: УРСС, 2003. — 336 с.
3. **Чантурия В. А.** Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Горн. журн. — 2005. — № 12. — С. 56–64.
4. **Чантурия В. А., Бунин И. Ж., Лунин В. Д.** Нетрадиционные методы дезинтеграции и вскрытия упорных золотосодержащих продуктов: теория и технологические результаты // Горн. журн. — 2005. — № 4. — С. 68–74.
5. **Портнов В. С., Юров В. М.** Связь магнитной восприимчивости магнетитовых руд с термодинамическими параметрами и содержанием железа // Горн. журн. — 2004. — № 6. — С. 122–127.
6. **Буллах А. Г., Буллах К. Г.** Физико-химические свойства минералов и компонентов гидротермальных растворов. — Л.: Недра, 1978. — 167 с.
7. **Кузнецов В. Д.** Поверхностная энергия твердых тел. — М.: Гостехиздат, 1954. — 490 с.
8. **Ребиндер П. А.** О влиянии изменений поверхностной энергии на спайность, твердость и другие свойства кристаллов // Съезд русских физиков. Перечень докладов, представленных на съезд, с кратким их содержанием. — М.-Л.: ГИЗ, 1928. — 29 с.
9. **Ролдугин В. И.** Физикохимия поверхности. — Долгопрудный: ИД “Интеллект”, 2008. — 424 с.
10. **Физические свойства горных пород и полезных ископаемых: справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман.** — М.: Недра, 1984. — 455 с.
11. **Пат. 57691 РК.** Способ измерения поверхностного натяжения твердых тел / В. М. Юров, А. Н. Ещанов, А. Т. Кукетаев // Оpubл. в БИ РК. — 2008. — № 12.
12. **Пат. 58155 РК.** Способ измерения поверхностного натяжения и плотности поверхностных состояний диэлектриков / В. М. Юров, В. С. Портнов, М. П. Пузеева // Оpubл. в БИ РК. — 2008. — № 12.
13. **Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Макаров П. В., Гриняев Ю. В.** Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. — Новосибирск: Наука, 1995. — 320 с.
14. **Комов И. Л.** Радиационная минералогия и геохимия. — Киев: Наук. думка, 2006. — 439 с.

15. **Бунин И. Ж.** Теоретические основы воздействия наносекундных электромагнитных импульсов на процессы дезинтеграции и вскрытия минеральных комплексов и извлечения благородных металлов из руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2009. — 345 с.
16. **Birringer R. and Gleiter H.** Nanocrystalline materials, Encyclopedia of Material Science and Engineering. Suppl., Vol. 1, Ed. R. W. Cahn, Oxford, Pergamon Press, 1988. — P. 339–349.
17. **Zhu X.** Structural investigation of nanocrystalline materials, PhD Thesis. Germany, Saarbrucken, University of Saarbrucken, 1986. — 77 p.
18. **Sui M. L. and Lu K.** Thermal expansion behavior of nanocrystalline Ni-P alloys of different grain size, Nanostruct. Mater., 1995, Vol. 6, No. 5–8. — P. 651–654.
19. **Макаров Г. Н.** Экспериментальные методы определения температуры и теплоты плавления кластеров и наночастиц // УФН. — 2010. — Т. 180. — № 2. — С. 185–207.
20. **Шестернев Д. М., Мязин В. П., Татауров С. Б.** Исследование криогенной дезинтеграции золото-кварцевых руд для интенсификации процесса кучного выщелачивания золота // ФТПРПИ. — 2006. — № 1–2. — С. 102–110.

Поступила в редакцию 01/III 2018