

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАГНЕТИТА И КВАРЦА В ФЕРРОМАГНИТНОЙ СУСПЕНЗИИ

С.Р. Гзогян

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия, e-mail: mehanobr1@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрен вопрос взаимодействия природных мономинеральных фракций кварца и магнетита в водной среде. Установлены условия и механизм их взаимодействия в щелочной водной среде: в процессе мокрого измельчения происходит интенсивное закрепление субмикронных частиц кварца на поверхности основного рудного минерала магнетита, что снижает эффективность раскрытия минералов, нивелирует разницу в свойствах их поверхности и, как следствие, эффективность разделения механическими методами в реальной среде разделения; притяжению, закреплению и удержанию субмикронных частиц кварца способствуют механические силы при измельчении и заряды, возникающие вследствие природного пьезоэффекта на поверхности частиц кварца; оптимум адгезионной активности субмикронных частиц железистого кварца и магнетита находится в одном интервале $pH = 7,5-9,5$ и характеризуется в этой области одной и той же смачиваемостью; минимальная сила адгезионного взаимодействия в жидкой среде разделения для приведенных в контакт субмикронных частиц кварца составит $6,7 \cdot 10^{-7}$ дин, магнетита — $20,6 \cdot 10^{-7}$ дин. Показано, что притяжению, прочному закреплению и удержанию субмикронных частиц кварца на поверхности магнетита в процессе их совместного мокрого измельчения способствуют условия и среда, в которых происходит процесс механического разделения.

Ключевые слова: магнетит, кварц, субмикронные частицы, электронная микроскопия, краевой угол смачивания, водородный показатель, потенциал, закрепление и удержание.

Для цитирования: Гзогян С. Р. Исследование состояния поверхности магнетита и кварца в ферромагнитной суспензии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 189–199. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-189-199.

Magnetite and quartz surface condition in ferro-magnetic suspension

S.R. Gzogyan

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia, e-mail: mehanobr1@yandex.ru

Abstract: The study focuses on interaction between monomineral fractions of quartz and magnetite in aqueous environment. The interaction conditions and mechanism of the minerals in an alkaline water medium are found. In the course of wet grinding, submicron-size particles of quartz vigorously attach to the surface of basic ore mineral—magnetite, which reduces efficiency of mineral dissociation, levels difference in their surface properties and, as a consequence, degrades their disintegration in a real separation medium. Attraction, attachment and holding of submicron-size quartz particles is promoted by mechanical forces of grinding and by charges caused by natural piezoelectric effect on the surface of quartz. The optimal adhesion activities of submicron-size particles of ferruginous

quartz and magnetite lie in the same interval of pH = 7.5–9.5 and are characterized with the same wettability. The minimum force of adhesion interaction in the liquid medium of separation for the contacting submicron-size particles is $6.7 \cdot 10^{-7}$ dyne for quartz and $20.6 \cdot 10^{-7}$ dyne for magnetite. It is shown that attraction, strong attachment and holding of submicron-size quartz particles on the surface of magnetite during their joint wet grinding is facilitated by the condition and medium of disintegration.

Key words: magnetite, quartz, submicron-size particles, electron microscopy, wetting angle, pH, potential, attachment and holding.

For citation: Gzogyan S. R. Magnetite and quartz surface condition in ferro-magnetic suspension. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;5:189-199. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-189-199.

Введение

В последнее время в мире наметился рост объемов добычи и переработки сырой руды (до 7%) обусловленный, в первую очередь, снижением качества как добываемых руд, так и товарной железорудной продукции. Такая тенденция приводит к снижению на мировом рынке металлургической ценности привлекательности и конкурентоспособности железорудной продукции, а также росту удельных затрат на ее производство [1, 2]. В то же время, растет спрос на высококачественную продукцию, пригодную для технологии их прямой металлизации. Металлургическая ценность ($Fe_{\text{прив}}$) и конкурентоспособность товарной продукции определяется массовой долей полезных и вредных примесей и шлакообразующих оксидов (табл. 1). Вредными примесями, уменьшающими металлургическую

ценность товарной продукции, являются сера и фосфор, оксиды магния, кальция и диоксид кремния — шлакообразующие оксиды, массовая доля которых изменяется в широких пределах. В результате изучения состава и свойств железорудной продукции установлено, что частицы основного рудного минерала (магнетита) во всех классах крупности покрыты шламами и присыпками из нерудных минералов (в основном кварца), а единичные частицы рудного находятся в них как в «рубашке» [3, 4].

Загрязнение поверхности частиц рудных минералов [4–6] происходит при измельчении за счет магнитно-адгезионного взаимодействия частиц в ферромагнитной суспензии, каковой является железорудная пульпа. Отсюда очевидно, что увеличение металлургической ценности, привлекательности и конкуренто-

Таблица 1

Химический состав магнетитовых концентратов Chemical composition of magnetite concentrates

Наименование компонента и оксидов	Массовая доля компонента в концентратах предприятий, %			
	ПАО «Михайловский ГОК»	АО «Комбинат КМАруда»	ОАО «Стойленский ГОК»	АО «Лебединский ГОК»
$Fe_{\text{общ}}$	65,1	66,05	66,7	68,56
CaO	0,17	0,23	0,13	0,16
MgO	0,25	0,34	0,30	0,28
$SiO_2_{\text{общ}}$	8,82	7,1	6,5	4,35
$S_{\text{общ}}$	0,007	0,032	0,03	0,11
$Fe_{\text{прив}}$	54,67	57,89	59,14	63,65

способности продукции стоит особо остро и разработка способов улучшения ее состава и свойств актуальна.

В представленной работе автор ставит своей целью изучение закономерностей взаимодействия магнетита и кварца в среде разделения (жидкой) в сочетании с возможными изменениями их состава и свойств в этих условиях, которые в конечном итоге приводят к накоплению диоксида кремния в железорудной продукции.

Аспекты по обессериванию железорудной продукции подробно изложены в [7].

Объекты и методы исследования

Объектом исследований является железорудная продукция обогатительных фабрик КМА и природные мономинеральные фракции магнетита и кварца, выделенные из железистых кварцитов КМА. Для кварца образцом сравнения служил стандартный образец (СОП 66 КП-Л ФГБУ «ВИМС»).

При моделировании технологических измерений и экспериментов исследуемый материал подвергался подготовке: ультразвуковой обработке (ультразвуковая ванна УЗВ-12, Сапфир, Россия) [8–10].

Чистота выделенных фракций проверена мессбауэровской спектроскопией, рентгено-фазовым, химическим и минералогическим анализом и установлено:

- мономинеральная фракция кварца в своем составе содержит изоморфные примеси в виде магнетита (0,9%) (табл. 2, рис. 1). Посторонние включения в кварце в виде магнетита, видимые под микроскопом, относятся к его дефектам (рис. 2);

- мономинеральная фракция магнетита в своем составе имеет незначительное количество изоморфных примесей, по своим параметрам выделенная фракция близка к стехиометрическому магнетиту (табл. 2).

Исследования осуществлялись с применением гранулометрического и хими-

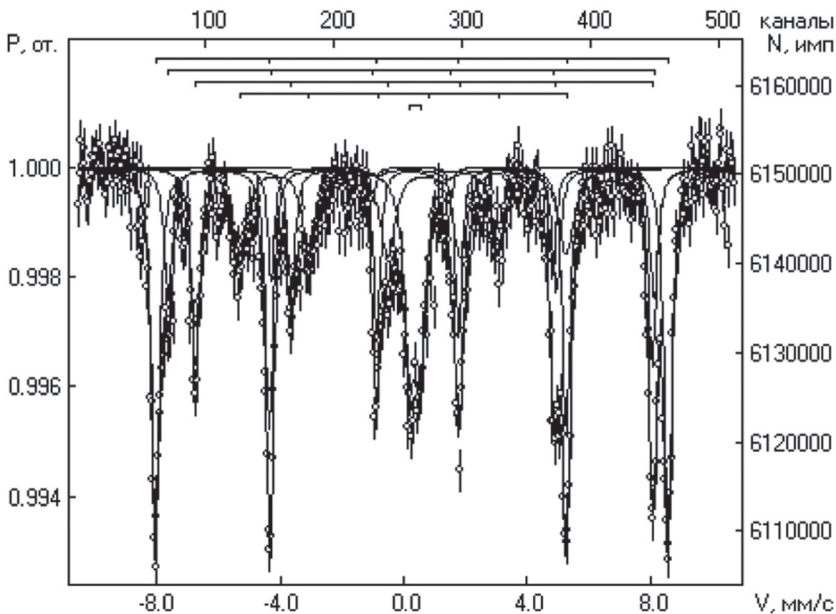


Рис. 1. Мессбауэровский спектр мономинеральной фракции ожелезненного кварца

Fig. 1. A Mossbauer spectrum of monomineral fractions of ferruginous quartz

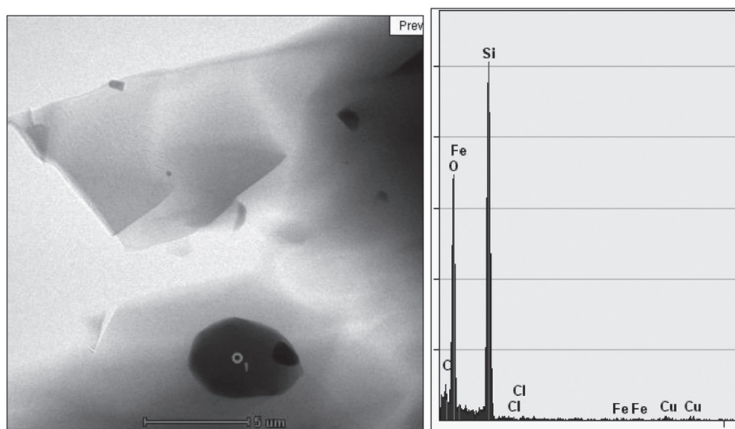


Рис. 2. Просвечивающая электронная микроскопия и результаты микроанализа мономинеральной фракции ожезненного кварца; (темное — субмикронные включения магнетита)

Fig. 2. Transmission electron microscopy and the results of the microanalysis of the mineral fraction of ferrous quartz (dark — submicron inclusions of magnetite)

ческого анализа, мессбауэровской спектроскопии, рентгено-фазового анализа, электронной микроскопии.

Мессбауэровские спектры снимались проф. НИТУ «МИСиС» В.В. Коровушкиным с использованием спектрометра Ms-1104 Em (РГУ, Ростов-на-Дону) с программой обработки спектров «Univem Ms». Спектры снимались с источником ^{57}Co в матрице родия, изомерный сдвиг определялся относительно $\alpha\text{-Fe}$.

Физико-химическое состояние поверхности магнетита и кварца оценивалось электрокинетическими измерениями (краевой угол смачивания, водородный показатель, ζ -потенциал). Электрокинетические измерения выполнялись по методу потенциала протекания через диафрагму минералов в ячейке Фюрстенау, измерение краевых углов смачивания

по модифицированной методике П.А. Ребиндера. Измерение водородного показателя и ζ -потенциала осуществлялось потенциометрическим методом с использованием анализатора жидкости «Мультитест-ИПЛ-513».

Дезинтеграция проб осуществлялась с применением дисковой вибрационной мельницы «RS 200» с размольной garniturой из агата (Retsch, Германия) до массовой доли 92,0% класса минус 0,045 мм (приблизена к крупности 3-ей стадии промышленного измельчения). Контроль крупности выполнялся с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц «Analysette 22 NanoTec» (Германия) по методу Фраунгофера (диапазон измерений от 0,1 — 1021,87 мкм; разрешение — 102 канала (20/383 мм); абсорбция — 11,0%;

Таблица 2

Химический состав мономинеральных фракций
Chemical composition of monomineral fractions

Мономинеральная фракция	Fe _{общ}	Fe _{магн}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO _{2общ}	SiO _{2своб}	Fe ⁺²
Кварц: природный стандартный образец	2,99	0,9	0,54	3,68 0,35	95,65 98,77	81,42	0,42
Магнетит	71,15	69,64	30,43	69,01	2,15	1,01	23,59

Таблица 3

Усредненная краткая характеристика технической воды
Averaged brief characteristics of process water

Параметр	Предприятие			
	АО «Лебединский ГОК»	ОАО «Стойленский ГОК»	АО «Комбинат КМАруда»	ПАО «Михайловский ГОК»
Водородный показатель, pH	7,7–8,7	7,9–8,3	7,4–8,2	7,9–9,4
Взвешенные вещества, мг/дм ³	0,5–49,0	8,5–200	34–100	0,4–50,0
Сухой остаток, мг/дм ³	595–835	510–750	770–845	590–835
Жесткость общая, мг экв/дм ³	3,95–5,5	4,6–6,0	5,4–6,0	4,0–5,5
Ионы:				
кальция, мг экв/дм ³	1,2–2,2	0,5–0,9	2,4–6,0	1,2–2,5
магния, мг экв/дм ³	2,5–3,6	1,7–3,4	0,1–3,2	2,3–3,6
Температура				
лето, °С	11–25	12–24	11–26	9–26
зима, °С	3–8	2–8	3–7	2–7

продолжительность — 90 сканов) и аналитической просеивающей машины Minor (Endecofts Ltd, Англия).

Для перемешивания (твердое + жидкое) использовалась лабораторная флотационная машина типа ФМЛ-0,3 с автоматическим регулированием числа оборотов импеллера, блока контроля температуры и pH пульпы в камере. В экспериментах использовалась дистиллированная или техническая (оборотная) вода, характеристика технической воды приведена в табл. 3.

Результаты исследований

Природный кварц является главной составной частью многих горных пород,

а также месторождений полезных ископаемых самого разнообразного генезиса и вторым по распространенности оксидом земной коры (в этом отношении уступает только воде). Кварц предельно гидрофилен, обладает большим сродством к воде. В результате механического воздействия или под влиянием деформации внутри кварца возникает электрическая поляризация с образованием электростатических зарядов на его поверхности (прямой пьезоэлектрический эффект) [5, 6]. Количественно дефектность структуры от микро- до макроуровня выделенных мономинеральных фракций оценивалась параметрами структурного состояния (табл. 4) [10]. Параметры структурного

Таблица 4

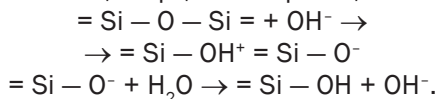
Параметры структурного состояния выделенных мономинеральных фракций
Parameters of the structural state of the selected monomineral fractions

Фракция	$D_{cp}, \text{Å}$	Плотность дислокаций блока мозаики, 10^{-11} см^{-2}		Структурные напряжения, ГПа	
		ρ_D	ρ_ε	σ^s	σ_D
магнетит	507,4	8,41	6,1	-2,23	0,46
кварц	968,5	6,12	1,59	0,82	0,47

Примечание: D_{cp} — средний размер блока мозаики, Å; ρ_D — плотность дислокаций на границе блока мозаики; ρ_ε — плотность дислокации в блоке мозаики; σ^s — величина средних структурных напряжений в минерале; σ_D — напряжение на границе блока.

состояния фракций, представленные в табл. 4, свидетельствуют о том, что частицы кварца испытывают деформацию сжатия, а магнетита — растяжения. Следовательно, величина поверхностного заряда частиц будет определяться трибоэлектрическим эффектом, процессами разрушения кварца, величиной остаточных структурных напряжений в минерале, размером частиц и валентностью элементов образующих минерал, а также плотностью дислокаций, как на границе, так и внутри блока мозаики (табл. 4).

При механическом воздействии (дезинтеграции) на поверхности кварца обнажаются силоксановые группы и разрываются связи между кислородом и кремнием с образованием ненасыщенных связей. В водной среде по каждому месту разрыва связей поглощается по одному иону H^+ и OH^- и поверхность кварца покрывается группами $=Si-OH$. В щелочной среде, каковой является техническая вода, в основе растворения частиц кварца лежат реакции:



В таких условиях потенциалопределяющими ионами являются H^+ и OH^- , соответственно знак и величина заряда

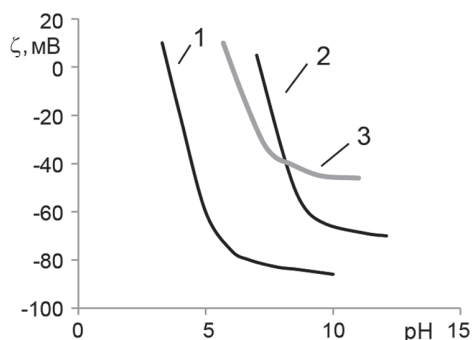


Рис. 3. Зависимость ζ -потенциала от pH среды: стандартный образец кварца (1); мономинеральная фракция кварца (2) и магнетита (3)

Fig. 3. Dependence of the ζ -potential on the pH of the medium: standard sample of quartz (1); monomineral fraction of quartz (2) and magnetite (3)

поверхности кварца в среде разделения определяется величиной pH среды. При вступлении во взаимный контакт субмикронных частиц кварца, обладающих даже низким поверхностным зарядом, между ними образуются силоксановые связи, необратимо удерживающие эти частицы вместе, обычно такой процесс происходит при pH более > 5 [5]. В соответствии с этим в среде при pH $< 7,0$ его поверхность заряжена положительно, а при pH $> 7,0$ — отрицательно.

Для рассмотрения агрегативной устойчивости системы «магнетит — субмикронные частицы кварца» и адгезии субмикронных частиц кварца на магнетите воспользуемся для характеристики свойств их поверхности электрокинетическим потенциалом ζ . Как известно [5, 6], ζ -потенциал является величиной, характеризующей устойчивость системы, на который сильное влияние оказывает pH и температура среды, и весьма важно рассмотреть влияние этих факторов на изменение величины ζ -потенциала. Объясняется это тем, что водородные (H^+) и гидроксильные ионы (OH^-) обладают высокой адсорбционной способностью. Особенно велика роль среды в тех случаях, когда в водной среде находится вещество, проявляющее амфотерность. Об этом наглядно свидетельствует характер изменения ζ -потенциала исследуемых фракций в зависимости от pH среды (исследование выполнено автором). Как показано на рис. 3, в области значений pH от 4,0 до 11,0 устанавливается отрицательное значение ζ -потенциала кварца (стандартный образец) (от -20 до -40 мВ), а в области от 7,5 до 9,5 его максимальное значение (от -60 до -78 мВ).

Следовательно, в этой области значений pH следует ожидать увеличение заряда поверхности и уменьшение значения краевого угла смачивания. Следовательно, в щелочной среде создаются

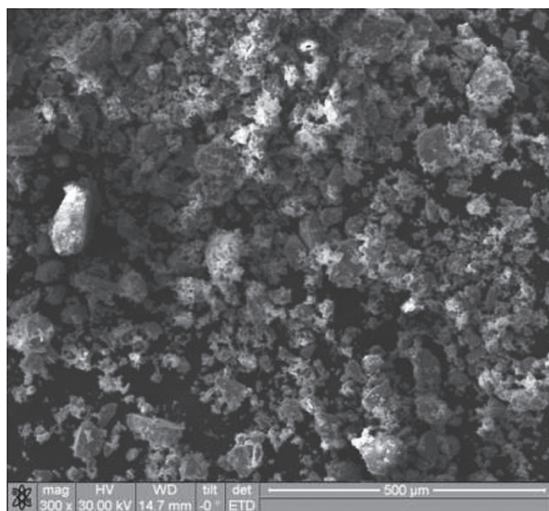


Рис. 4. Магнетитовый концентрат класс плюс 0.045 мм, зерна магнетита (темное) покрытые субмикронными частицами кварца (светлое), увеличение 5000

Fig. 4. Magnetite concentrate class plus 0.045 mm, magnetite grains (dark) coated with submicron quartz particles (light), uvel. 5000

благоприятные условия для закрепления и удержания субмикронных частиц кварца на положительно заряженных частицах других минералов. Характер изменения величины ζ -потенциала мономинеральной фракции кварца (ожелезненного) несколько иной, отрицательное значение ζ -потенциала устанавливается в области значений pH от 7,5 до 11, но значения этого параметра не превышает -60 мВ. Следовательно, при высоких значениях pH среды поверхность кварца сильно заряжена. Адгезия субмикронных частиц кварца происходит в присутствии частиц, способных адсорбироваться одновременно на поверхности двух различных частиц кварца, связывая их, таким образом, вместе. Это имеет место в присутствии какого-то катионного агента, способного притягивать отрицательно заряженную частицу кварца, что позволяет ей удерживаться на поверхности, например, магнетита за счет образования водородной связи.

Субмикроскопические шероховатости и полярность такой поверхности возрастает, а адгезионное взаимодействие

субмикронных частиц кварца с магнетитом увеличивается, что способствует их прочному закреплению и удержанию на поверхности магнетита. В данном случае эта адгезионная связь зависит от природы контактирующих тел, свойств их поверхностей и площади контакта, что наглядно иллюстрируется рис. 4.

Адгезионное взаимодействие субмикронных частиц кварца с поверхностью частиц магнетита обуславливается еще и свойствами их поверхности, что определяется способностью этих частиц к смачиванию. Критерием оценки смачивания является краевой угол смачивания (Θ). Поэтому имеет место определенная закономерность между краевым углом смачивания субмикронных частиц кварца и магнетита и их адгезионным взаимодействием.

Как показано на рис. 5, в области значений pH от 8,0 (для магнетита) и 10,5 (для кварца) устанавливается максимальное значение Θ , а в области от 8,1 до 9,0 способность к смачиванию у этих частиц одинакова. Сила адгезионного взаимодействия субмикронных

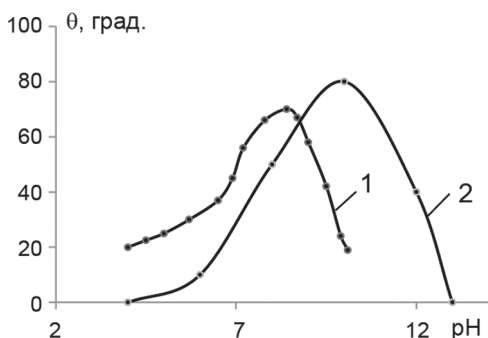


Рис. 5. Изменение краевого угла смачивания (θ) мономинеральной фракции магнетита (1) и кварца (2) от pH среды.

Fig. 5. Changing the contact angle (θ) of the monomineral fraction of magnetite (1) and quartz (2) from the pH of the medium

частиц кварца с магнетитом в этом интервале значений pH в жидкой среде достигнет своего максимального значения [5]. Субмикроскопическая шероховатость поверхности контактирующих частиц только увеличит в водной среде их адгезионное взаимодействие. Свойства контактирующих частиц определяют способность этих частиц к смачиванию жидкостями, что предопределяет закономерность между их краевым углом смачивания и адгезией. Как показано [5, 6, 11, 12], по величине краевого угла смачивания можно оценить адгезионную способность частиц, а сила адгезии в водной среде достигает максимального значения, когда способность контактирующих частиц смачиваться одна и та же, как в нашем случае.

Для расчета минимальной силы адгезии (F_{\min}) воспользуемся формулой Г.И. Фукса (в диапазоне диаметра частиц от 5 до 50 мкм):

$$F_{\min} = fd,$$

где f — коэффициент ($f = 10^{-7}$ дин/мкм); d — диаметр частиц, мкм ($d_{\text{SiO}_2} = 6,7$ мкм; $d_{\text{Mgt}} = 20,6$ мкм).

В нашем случае сила адгезионного взаимодействия в водной среде для субмикронных частиц кварца составит $6,7 \cdot 10^{-7}$ дин, для магнетита — $20,6 \cdot 10^{-7}$ дин.

Обычно процесс образования адгезионной связи делят на две стадии: перемещение (транспортирование) и непосредственное взаимодействие.

На первой стадии происходит перемещение контактирующих частиц и их ориентирование в межфазном слое, обеспечивающее их тесный контакт. Интенсификации протекания первой стадии процесса адгезии существенное влияние оказывает повышение температуры.

Вторая стадия адгезии — это непосредственное взаимодействие контактирующих частиц, которое может быть обусловлено разными силами (от сил Ван-дер-Ваальса до химических).

Воспользуемся одной из теорий адгезии — электрической (предложена Б.В. Дерягиным и Н.А. Кротовой), согласно которой адгезия реализуется путем контактной электризации, имеющей место при тесном взаимодействии контактирующих частиц. Контактующие частицы в адгезионном соединении отождествляются с обкладками электрического конденсатора, а процесс их разъединения — с раздвижением его обкладок. При этом между контактирующими частицами возникает разность потенциалов, которая растет с увеличением зазора между ними до наступления электрического разряда. При медленном разъединении контактирующих частиц заряды успевают стечь с обкладок конденсатора, при высокой скорости разъединения высокая плотность заряда на обкладках конденсатора сохраняется вплоть до наступления разряда.

Таким образом, результатами проведенных исследований показано, что оптимум адгезионной активности субмикронных частиц железистого кварца находится в интервале pH = 7,5–9,5.

Основной рудный минерал железистых кварцитов магнетит представляет собой смешанный оксид железа $\text{Fe}^{+3}(\text{Fe}^{+2} \text{Fe}^{+3})\text{O}_4$ с составом FeO — 31,03;

Fe_2O_3 — 68,97 (теоретический); выделенная мономинеральная фракция — FeO — 30,43; Fe_2O_3 — 69,01% (табл. 1).

Изменение ζ -потенциала мономинеральной фракции магнетита при различных значениях pH среды приведено на рис. 5, откуда видно, что изменения ζ -потенциала для магнетита и кварца имеют достаточно близкий характер. В диапазоне значений pH от 5,6 до 6,5 ζ -потенциал магнетита имеет положительные значения ($\sim +5$ мВ), после чего наблюдается быстрое смещение потенциала в область отрицательных значений с перезарядкой поверхности при pH $\sim 7,5$, в интервале pH = 7,5—9,0 устанавливается максимальное его значение (~ -45 мВ).

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что оптимум адгезионной активности субмикронных частиц кварца и магнетита находится в одном интервале pH = 7,5—9,5.

На ζ -потенциал оказывает влияние и температура среды. С повышением температуры ζ -потенциал должен расти вследствие возрастания интенсивности теплового движения противоионов и увеличения толщины двойного электриче-



Рис. 6. Характер изменения ζ -потенциала от температуры

Fig. 6. The nature of the ζ -potential change from temperature

ского слоя [5, 6]. Однако одновременно может возрастать и десорбции потенциалопределяющих ионов и при этом ζ -потенциал уменьшается, а при понижении температуры должна наблюдаться обратная зависимость (рис. 6).

Адгезионное взаимодействие частиц магнетита и субмикронных частиц кварца является самопроизвольным процессом и обусловлено свойствами контактирующих частиц при соответствующих условиях, приведенных выше, т.е. в промышленных условиях созданы все условия для системы в ее стремлении к уменьшению поверхностной энергии. Свидетельством этого служит анализ маг-

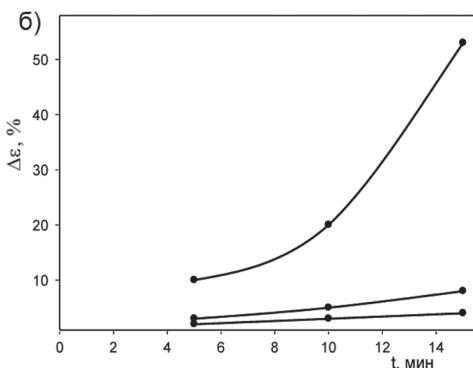
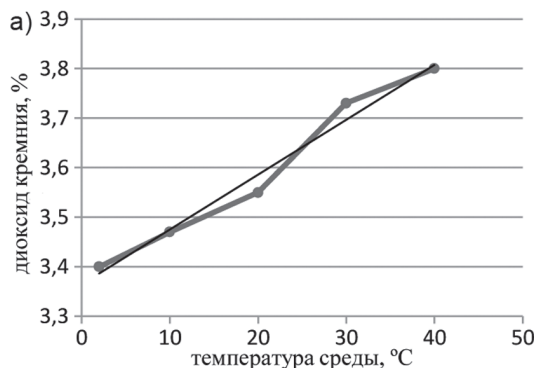


Рис. 7. Зависимость массовой доли диоксида кремния в концентрате от температуры среды (линия Тренда) (а) и извлечение кварца в концентрат в зависимости от времени и способа измельчения (б): шаровое мокрое (1), мокрое (2) и сухое (3) с агатовой фурнитурой

Fig. 7. The dependence of the mass fraction of silicon dioxide in the concentrate on the temperature of the medium (Trend line) (a) and the extraction of quartz into the concentrate depending on the time and method of grinding (b): wet ball (1), wet (2) and dry (3) with agate fittings

нетитовых концентратов, полученных в разный климатический период, который показывает изменение массовой доли диоксида кремния в концентрате в зависимости от температуры среды (рис. 7).

Лабораторные эксперименты, проведенные при измельчении в различных условиях, подтверждают высокую адгезионную активность кварца ожелезненного (рис. 7, б). Кварц, измельченный в стальной мельнице стальными шарами в водной среде, извлекался в концентрат лучше измельченного в мельнице с агатовой фурнитурой как мокрым, так и сухим способом.

Полученные результаты

Таким образом, установлено:

- притяжению, закреплению и удержанию субмикронных частиц кварца способствуют механические силы при измельчении и заряды на поверхности частиц кварца, возникающие вследствие природного пьезоэффекта кварца, и магнетита;
- в процессе мокрого измельчения, происходит интенсивное закрепление

субмикронных частиц кварца на поверхности основного рудного минерала магнетита, (образование «техногенных сростков»), что снижает эффективность раскрытия минералов, нивелирует разницу в свойствах их поверхности и, как следствие, эффективность разделения механическими методами в реальной среде разделения;

- оптимум адгезионной активности субмикронных частиц ожелезненного кварца и магнетита находится в одном интервале $\text{pH} = 7,5\text{--}9,5$ и характеризуется в этой области одной и той же смачиваемостью;
- минимальная сила адгезионного взаимодействия в жидкой среде разделения для приведенных в контакт субмикронных частиц кварца составит $6,7 \cdot 10^{-7}$ дин, для магнетита — $20,6 \cdot 10^{-7}$ дин;
- притяжению, прочному закреплению и удержанию субмикронных частиц кварца на поверхности магнетита в процессе их совместного мокрого измельчения способствуют условия и среда, в которых происходит процесс механического разделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гзогян Т. Н.* Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 4. — С. 389—393.
2. *Rath, Rajendra Kumar., Mohanty, Sunati., Nayak, Bibhuranjan, Singh, Ratnakar, Bhattacharya, Kalyan Kumar.* A comparative study on processing of high alumina hematite iron ore by gravity, magnetic and flotation methods // *Journal of Materials Science and Engineering A*, 2013, 3(5), pp. 349—354.
3. *Vinnikov V. A., Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Zilbershmidt M. G., Gzogyan T. N.* Environmental resource — economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition // *Environment. Technology. Resources Proceedings of the 9th International Scientific and Praktikal Conference. Vol. 1. Rezeknes Augstskola. Rezekne. RA Izdevnieciba.* 2013, pp. 209—215.
4. *Гзогян С. Р.* Исследование механизма закрепления субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов джеспилитов // *Научные ведомости БелГУ.* — 2017. — № 25. — вып. 4. — С. 109—115.
5. *Зимон А. Д.* Коллоидная химия. — М.: Красанд, 2015. — 342 с.
6. *Drzymala J.* Mineral processing: fundamentals of theory and practice from mineralurgy. Wrocław: Wrocław University of Technology, 2007, 510 p.
7. *Гзогян С. Р., Чантурия Е. Л.* Влияние термических воздействий на оксиды и сульфиды железа // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2010. — № 5. — С. 63—69.
8. *Papalambros P. Y., Wilde D. J.* Principles of optimal design: modeling and computation, Third ed. Cambridge University Press, New York, NY; Cambridge, United Kingdom. 2017. 376 p.

9. Bhadani K., Asbjörnsson G., Hulthén T., Evertsson M. Application of multi-disciplinary optimization architectures in mineral processing simulations // *Minerals Engineering*. 128, Nov. 2018, Pp. 27–35.

10. Султаналиева Р. М. Определение параметров структурного состояния горных пород рентгенографическим методом // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*, 2017. — т. 17, № 8. — С. 197–200.

11. Gzogyan S. R. Analysis of the influence of the liquid medium of obtaining concentrates for the homeless metallurgy // *The European Journal of Technical and Natural Sciences*, Premier Publishing s.r.o. 2018, vol. 4, Pp. 46–49.

12. Oliazadeh M., Vazirizadeh A. Removing impurities from iron ores: methods and industrial cases // XXVIII IMPC, Quebec, September 11–15, 2016. Paper 711. Pp. 1–13. **ТНБ**

REFERENCES

1. Gzogyan T. N. Theoretical and experimental studies of high-quality concentrates. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 4, pp. 389–393. [In Russ].

2. Rath, Rajendra Kumar., Mohanty, Sunati., Nayak, Bibhuranjan, Singh, Ratnakar, Bhat-tachrya, Kalyan Kumar. A comparative study on processing of high alumina hematite iron ore by gravity, magnetic and flotation methods. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 2013, 3(5), pp. 349–354.

3. Vinnikov V. A., Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Zilbershmidt M. G., Gzogyan T. N. Environmental resource – economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition. *Environment. Technology. Resources Proceedings of the 9th International Scientific and Praktikal Conference*. Vol. 1. Rezeknes Augstskola. Rezekne. RA Izdevnieciba. 2013, pp. 209–215.

4. Gzogyan S. R. Research on the consolidation of submicron particles of quartz on the surface of ore minerals jaspilites. *Nauchnye vedomosti BelGU*. 2017, no 25, вып. 4, pp. 109–115. [In Russ].

5. Zimon A. D. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid chemistry], Moscow, Krasand, 2015, 342 p.

6. Drzymala J. *Mineral processing: fundamentals of theory and practice from minerallurgy*. Wrocław: Wrocław University of Technology, 2007, 510 p.

7. Gzogyan S. R., Chanturiya E. L. The current state of the theory and practice of obtaining high-quality magnetite concentrates. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 5, pp. 63–69. [In Russ].

8. Papalambros P. Y., Wilde D. J. *Principles of optimal design: modeling and computation*, Third ed. Cambridge University Press, New York, NY; Cambridge, United Kingdom. 2017. 376 p.

9. Bhadani K., Asbjörnsson G., Hulthén T., Evertsson M. Application of multi-disciplinary optimization architectures in mineral processing simulations. *Minerals Engineering*. 128, Nov. 2018, Pp. 27–35.

10. Sultanalieva R. M. Determination of the parameters structural state of rocks X-RAY method. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*, 2017, vol. 17, no 8, pp. 197–200. [In Russ].

11. Gzogyan S. R. Analysis of the influence of the liquid medium of obtaining concentrates for the homeless metallurgy. *The European Journal of Technical and Natural Sciences*, Premier Publishing s.r.o. 2018, vol. 4, Pp. 46–49.

12. Oliazadeh M., Vazirizadeh A. Removing impurities from iron ores: methods and industrial cases. XXVIII IMPC, Quebec, September 11–15, 2016. Paper 711. Pp. 1–13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гзогян Семен Райрович — старший научный сотрудник,
Белгородский государственный национальный исследовательский университет
(НИУ «БелГУ»), e-mail: mehanobr1@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

S. R. Gzogyan, Senior Researcher, e-mail: mehanobr1@yandex.ru,
Belgorod State National Research University, 308015, Belgorod, Russia.