

УДК 622.17:622.778:004.9

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ
СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИИ
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МАГНЕТИТА**

С. П. Остапенко, А. С. Опалев

Горный институт КНЦ РАН,

E-mail: a.opalev@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия

С целью компьютеризации исследований при совершенствовании технологии переработки железных руд разработан методологический подход к изучению структуры и механических свойств суспензии тонкодисперсных магнитных частиц. В его основе — имитационное моделирование движения агрегатов частиц в жидкости и калибровка параметров модели экспериментальными данными о зависимости вязкости от температуры и скорости сдвига. Исследована структура агрегата частиц магнетита и определены длина и состав цепочки частиц, образующейся вследствие магнитного диполь-дипольного взаимодействия. На примере суспензии кварца и магнетита показано, что вследствие внутреннего вращения происходит сворачивание цепочечного агрегата в клубок, увеличение вязкости суспензии в присутствии противоположно заряженных частиц примеси при консолидации и сжатии клубков на примере суспензии кварца и магнетита.

Железные руды, магнетит, кварц, тонкодисперсные частицы, суспензия, модель компьютерная, цепочечная модель, коэффициент трансляционной диффузии, вязкость, цифровая трансформация

DOI: 10.15372/FTPRPI20250114

EDN: SFKZOM

Переход к цифровой экономике предполагает цифровую трансформацию жизненного цикла горнообогатительных предприятий, включающую компьютерное сопровождение разработки и совершенствование технологий переработки минерального сырья, их реализации, эксплуатации и прекращения применения. Необходимая составляющая цифровой трансформации — изучение технологических процессов обогатительного передела с использованием соответствующих моделей.

Разработка новых и совершенствование существующих технологий обогащения полезных ископаемых для удовлетворения потребности металлургической отрасли в исходном сырье обусловлена исчерпанием высокосортных и переработкой бедных, труднообогатимых руд

Работа выполнена в рамках госзадания № FMEZ-2022-0003. Моделирование и обработка данных проведена с использованием свободно распространяемого программного обеспечения: программного пакета молекулярной динамики LAMMPS (США) и программного пакета статистических расчетов R (Австрия).

и техногенного минерального сырья. Одна из проблем переработки минерального сырья с низким содержанием полезного компонента — необходимость тонкого измельчения и, как результат, образование тонкодисперсных (микронных и субмикронных) частиц минералов, направляемых в настоящее время в отходы [1–4].

Увеличение объема отходов из-за переработки минерального сырья с низким содержанием полезного компонента и экологические последствия их хранения представляют проблему для горнопромышленных регионов. Так, ликвидация последствий загрязнения тонкодисперсными частицами минералов из-за негативного воздействия на здоровье человека и окружающую среду сопровождается значимыми социальными и экономическими затратами [5, 6].

При разработке подходов для выделения тонкодисперсных частиц полезного компонента из отходов представляет интерес изучение свойств частиц магнетита ввиду больших объемов переработки железных руд [3, 7]. Известно, что из-за уменьшения магнитных свойств тонкодисперсных частиц магнетита близость энергии магнитного диполь-дипольного взаимодействия и кинетической энергии обуславливают зависимость самоорганизации частиц магнетита в цепочечные агрегаты от скорости их движения [8–13]. В этой связи является актуальным исследование строения и взаимодействия агрегатов частиц магнетита, определяющих структурно-механические свойства суспензии.

Методологический подход к исследованию свойств суспензии магнетита, в соответствии с современной тенденцией к компьютеризации [14–16], заключается в поэтапной разработке и калибровке параметров имитационной модели агрегатов частиц в ламинарном потоке жидкости, основанной на численном решении системы уравнений движения частиц. На первом этапе для расчета длины модельного цепочечного агрегата экспериментально определяются размер и плотность агрегатов частиц по коэффициенту их трансляционной диффузии и характеристической вязкости суспензии магнетита. На втором этапе для параметризации взаимодействия агрегатов с жидкостью и между собой используются результаты оценки параметров модели магнитной суспензии тонкодисперсных частиц в условиях теплового равновесия в отсутствие сдвиговой деформации [9]. В отличие от разработанной ранее модели суспензии в равновесных условиях, диполь-дипольное взаимодействие частиц аппроксимируется связью FENE [17], что позволяет учитывать разрыв цепочечных агрегатов при расчете их движения. На третьем этапе выполняется калибровка базовых модельных параметров экспериментальными данными о температурной зависимости вязкости суспензии магнетита при разных скоростях сдвига. Эвристические возможности разработанной модели демонстрируются на примере влияния взаимодействия частиц кварца с магнетитом на структурно-механические свойства суспензии.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка компьютерной модели агрегатов магнитных частиц проводилась на примере магнетита месторождений Заимандровского железорудного района (Мурманская область). Для получения суспензии микронных частиц исходные фракции магнетитового концентрата крупностью –25 + 17 мкм с содержанием железа 72 % и кварца крупностью –200 + 100 мкм с содержанием 99 % измельчались в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 7 Premium line в размольных стаканах с футеровкой из оксида циркония с использованием дистиллированной воды без добавления реагентов. Выделение тонкодисперсных частиц минералов проводилось седиментацией в центробежном поле на лабораторной центрифуге и контролировалось методом лазерной дифракции на приборе Fritsch Analysette 22.

Для параметризации агрегатов магнитных частиц на первом этапе разработки компьютерной модели определялся гидродинамический диаметр агрегатов частиц магнетита методом динамического рассеяния света (метод фотонной корреляционной спектроскопии) на установке Фотокор Compact Z, снабженной лазером с длиной волны 637.5 нм мощностью 35 мВт, по флуктуации интенсивности лазерного излучения, рассеянного суспензией под углом 160°, при температуре 10–60 °С. Гидродинамический диаметр агрегатов рассчитывался по коэффициенту трансляционной диффузии наиболее крупных частиц суспензии с использованием программного обеспечения прибора.

Дзета-потенциал магнетита и кварца определялся методом динамического рассеяния света в режиме измерения скорости потока по скорости движения частиц в наложенном электрическом поле на установке Фотокор Compact Z. Заряд поверхности частиц минералов при исследовании структурно-механических свойств суспензии регулировался добавлением водного раствора цетилтриметиламмония.

Структурно-механические свойства суспензии магнетита исследовались по кривым вязкости, полученным с использованием ротационного вискозиметра Viscotester VT550, снабженного измерительной системой MV-DIN. Чтобы снизить влияние седиментации частиц на результаты, измерения вязкости суспензии проводились в 60 % растворе сахарозы. Для определения плотности агрегатов частиц магнетита рассчитывалась характеристическая вязкость суспензии путем экстраполяции концентрационной зависимости кривых вязкости на нулевое содержание магнетита. Кривые вязкости суспензии, полученные в диапазоне температур 10–60 °С, использовались на этапе калибровки базовых параметров расчетной модели.

Для расчета движения частиц и их агрегатов в суспензии применялся программный пакет молекулярной динамики LAMMPS. Статистическая обработка результатов и калибровка компьютерной модели агрегатов магнитных частиц проводились с помощью программного пакета статистических расчетов R (R Development Core Team, R Foundation for Statistical Computing).

РАСЧЕТ ДЛИНЫ ЦЕПОЧЕЧНОГО АГРЕГАТА ЧАСТИЦ МАГНЕТИТА

Для параметризации модели цепочечного агрегата оценивалось число составляющих его частиц магнетита с использованием кривых вязкости и коэффициентов трансляционной диффузии суспензии.

Характеристическая вязкость суспензии магнетита определялась как предельная вязкость, приведенная к содержанию минерала [18, 19]:

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \left(\frac{\eta(C) - \eta_0}{\eta_0} \frac{1}{C} \right),$$

где C — весовое содержание магнетита в суспензии; η — вязкость суспензии; η_0 — вязкость растворителя; $C \rightarrow 0$ — экстраполяция концентрационной зависимости на нулевое содержание.

Количество частиц магнетита в агрегате рассчитывалось с учетом коэффициента трансляционной диффузии и соотношения объемной и весовой концентрации суспензии на основе системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_c = \frac{k_B T}{6\pi\eta D_c}, \quad R_p = \frac{k_B T}{6\pi\eta D_p}; \\ \rho_c = \frac{\varphi}{C} = \frac{1}{2.5} \lim_{G_p \rightarrow 0}([\eta]); \\ N = \frac{M_c}{M_p} = \frac{2.5 \cdot 4\pi \frac{R_c^3}{3} [\eta]}{4\pi\rho_m \frac{R_p^3}{3}} = 2.5 \frac{R_c^3}{\rho_m [\eta] R_p^3}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь N — количество частиц магнетита в агрегате; D_c, D_p — коэффициент трансляционной диффузии клубка и частицы магнетита; M_c, M_p — масса клубка и частицы магнетита; R_c, R_p — радиус клубка и частицы магнетита; ρ_c, ρ_m — плотность агрегата частиц и магнетита; G_p — скорость сдвига; φ — объемная доля магнетита в суспензии; $G_p \rightarrow 0$ — экстраполяция скорости сдвига на нулевое значение.

Размеры клубка и частиц магнетита рассчитывались по формуле Стокса–Эйнштейна и экспериментально определенным коэффициентам трансляционной диффузии (первые два уравнения системы (1)).

Экстраполяция характеристической вязкости на отсутствие сдвиговой деформации обеспечивала возможность использования результатов оценки размеров клубка и частиц магнетита методом динамического рассеяния света для определения состава цепочечного агрегата. При расчете принималось справедливым уравнение Эйнштейна для характеристической вязкости сплошных сферических частиц или условно непротекаемых клубков [20], чем обеспечивалась связь плотности агрегата частиц (как предела отношения объемной и весовой концентрации в отсутствие сдвиговой деформации) с характеристической вязкостью суспензии (третье уравнение системы). Вычисление числа частиц в агрегате производится с помощью четвертого уравнения системы.

Установлено, что в зависимости от температуры суспензии цепочечный агрегат включает от 200 до 330 частиц магнетита (рис. 1).

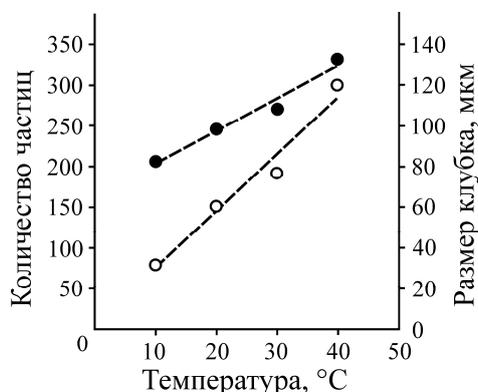


Рис. 1. Зависимость количества частиц в цепочечном агрегате и размера клубка от температуры суспензии (размер частицы магнетита 1 мкм)

Число частиц магнетита в цепочечном агрегате, полученное с использованием данных о вязкости и светорассеянии суспензии, совпадает с результатами микроскопического исследования структуры агрегатов ферромагнитных частиц [10], что свидетельствует об адекватности применяемого в данной работе подхода. Следует отметить симбатное увеличение числа частиц магнетита в цепочечном агрегате с размером клубка (рис. 1), что с учетом результатов микроскопических наблюдений, приведенных в [10], объясняется разветвлением цепочки частиц при увеличении температуры суспензии.

Контурная длина цепочки частиц магнетита размером 1 мкм в исследованном диапазоне температур превышает размер агрегата частиц в среднем в 2 раза (рис. 1), свидетельствуя о свернутости цепочки частиц в клубок.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ В АГРЕГАТАХ

Разработка модели цепочечного агрегата частиц магнетита основывалась на результатах рассмотрения баланса энергии взаимодействующих магнитных частиц, проведенного на предыдущем этапе исследований [9], что позволило не учитывать действие дисперсионных и электростатической сил при моделировании агрегатов. Диполь-дипольное магнитное взаимодействие частиц магнетита размером 1 мкм аппроксимировалось системой уравнений, которая обеспечивала возможность моделирования разрыва цепочечных агрегатов и внутреннего вращения сегментов цепи:

$$\begin{cases} u_s(r_{ij}) = -0.5K_{\text{FENE}}R_0 \ln \left[1 - \left(\frac{r_{ij}}{R_0} \right)^2 \right] + 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \right] + \varepsilon; \\ u_a(r_{ij}, \theta) = K_a [1 - \cos(\theta - \theta_0)]; \\ u(r_{ij}, \theta) = u_s(r_{ij}) + u_a(r_{ij}, \theta), \end{cases} \quad (2)$$

где u_s — потенциал (энергия) связи FENE (Finite Extensible Nonlinear Elastic); r_{ij} — расстояние между центрами i -й и j -й частиц; K_{FENE} — жесткость связи FENE; R_0 — наибольшее удлинение связи FENE; σ — расстояние между частицами, характеризующее радиус действия сил стерического отталкивания; ε — энергия стерического отталкивания частиц, определяющая интенсивность взаимодействия; u_a — потенциал (энергия) деформации угла связи i -й и j -й частиц; K_a — жесткость угла связи FENE; θ — угол связи FENE; θ_0 — равновесный угол связи FENE.

Начальная параметризация первого слагаемого уравнения связи FENE, отвечающего за притяжение магнитных частиц ($K_{\text{FENE}} = 20$, $R_0 = 5$; значения нормированы на энергию теплового движения и размер частицы соответственно), проводилась с использованием оценки диполь-дипольного взаимодействия магнитных частиц, полученной в [9], и уточнялась на этапе калибровки модели агрегатов магнитных частиц по экспериментальным данным о температурной зависимости вязкости суспензии магнетита. Энергия и радиус действия сил отталкивания частиц во втором и третьем слагаемых уравнения связи FENE подбирались таким образом, чтобы обеспечить стерическое ограничение на взаимное проникновение модельных частиц с учетом их размера:

$$\begin{cases} u_m(r_{12}, m) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{m^2}{(r_{12})^3}; \\ f(K_{\text{FENE}}, \varepsilon) = \max\{(u_m(r_{12}, m) - u_s(r_{12}))^2\} \rightarrow \min; \\ \sigma = r_m, R_0 = 5r_m, \end{cases} \quad (3)$$

где u_m — потенциал (энергия) магнитного диполь-дипольного взаимодействия при последовательной ориентации частиц магнетита; u_s — потенциал (энергия) связи FENE, уравнение зависимости приведено в системе (2); r_{12} — расстояние между центрами частиц магнетита; m — магнитный дипольный момент частицы магнетита; $r_m = 0.5$ мкм — радиус частиц магнетита.

Для параметризации второго уравнения системы (2) использовалась процедура, основанная на аппроксимации угловой зависимости энергии диполь-дипольного взаимодействия косинусом угла между магнитными дипольными моментами частиц с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} u_m(\vec{r}_{12}, \vec{m}_1, \vec{m}_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} [(\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2) / r_{12}^3 - 3[(\vec{m}_1 \cdot \vec{r}_{12})(\vec{m}_2 \cdot \vec{r}_{12})] / r_{12}^5]; \\ u_a(\theta) = K_a [1 - \cos(\theta - \theta_0)]; \\ f(K_a, \theta_0) = \max\{(u_m(\vec{r}_{12}, \vec{m}_1, \vec{m}_2) - u_a(\theta))^2\} \rightarrow \min; \\ |\vec{m}_1| = |\vec{m}_2|, \quad \theta = \arccos(\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2 / |\vec{m}_1| |\vec{m}_2|). \end{cases} \quad (4)$$

Здесь u_m — потенциал магнитного диполь-дипольного взаимодействия частиц; \vec{r}_{12} — вектор, соединяющий точечные магнитные диполи; \vec{m}_1, \vec{m}_2 — магнитный дипольный момент частиц магнетита; u_a — потенциал деформации угла связи частиц; θ — угол между магнитными дипольными моментами частиц; θ_0 — равновесный угол связи.

Установлено, что модель связи FENE, параметризованная с помощью расчета по системам уравнений (2)–(4), обеспечивает аппроксимацию энергии магнитного диполь-дипольного взаимодействия частиц в области ее экстремума с точностью 9% (при сравнении u_s и u_m в системах уравнений (2) и (4) соответственно). Дальнодействие магнитного диполь-дипольного взаимодействия, аппроксимированного потенциалом связи FENE, и подвижность угла между диполями (u_s и u_a в системе (2)) обуславливают последовательное соединение магнитных диполей и свободу внутреннего вращения, что приводит к сворачиванию цепочечного агрегата частиц с образованием клубка и подтверждается экспериментально при условии отсутствия сдвиговой деформации.

МОДЕЛЬ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИИ МАГНЕТИТА

Для изучения деформации цепочечного агрегата частиц и моделирования структурно-механических свойств суспензии была разработана имитационная компьютерная модель трехмерного движения частиц в течении Куэтта, учитывающая взаимодействия между частицами в соответствии с потенциалом Леннарда–Джонса и уравнениями системы (2). В модельный

объем кубической формы с подвижной гранью для создания сдвиговой деформации помещались модельные частицы жидкости ($3 \cdot 10^4$) и частицы, соединенные связью FENE (система (2)) в цепочечные агрегаты (10^3 частиц). Модельные цепочечные агрегаты составлялись из 10^2 частиц, что соответствовало среднему составу агрегатов в исследованной области сдвиговой деформации суспензии магнетита. В ходе вычислительных экспериментов определялось положение, скорость движения частиц и вязкость. Для характеристики цепочечных агрегатов рассчитывалась относительная анизотропия их формы [21]:

$$k = \frac{3}{2} \frac{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2}{(l_x^2 + l_y^2 + l_z^2)^2} - \frac{1}{2}, \quad (5)$$

где k и l_x, l_y, l_z — относительная анизотропия формы и собственные числа тензора вращения агрегата модельных частиц соответственно. Пределы изменения k от 0 до 1 соответствуют изменению цепочечного агрегата частиц от сферической формы до линейной.

Установлено, что в динамических условиях под влиянием сдвиговой деформации клубок модельных частиц разворачивается. Это сопровождается изменением его формы от эллиптической до близкой к линейной (врезки на рис. 2, отнесенные, соответственно, к области малых и больших скоростей сдвига). Вязкость суспензии магнетита уменьшается одновременно с увеличением скорости сдвига, что свидетельствует о наличии взаимодействия агрегатов частиц и о правомерности использования для калибровки компьютерной модели. Неньютоновский характер течения суспензии магнетита подтверждается экспериментальными данными [22].

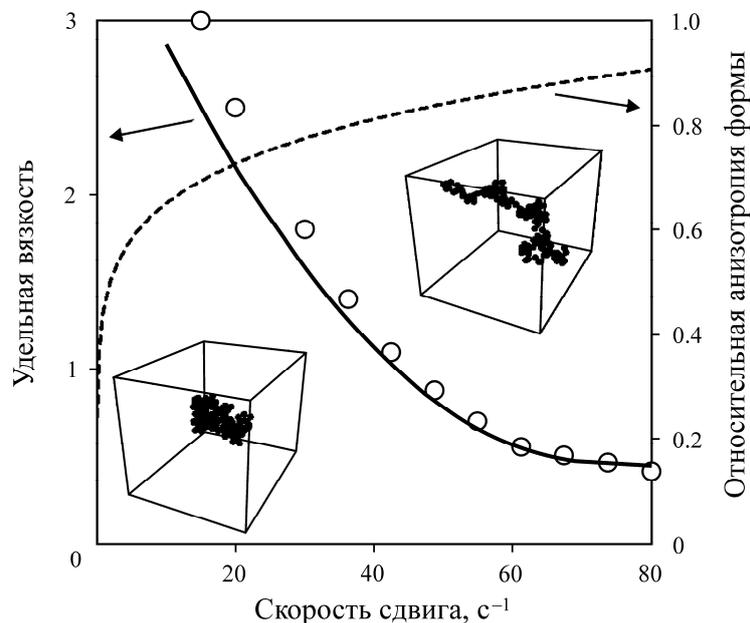


Рис. 2. Зависимость вязкости суспензии и анизотропии формы агрегатов от скорости сдвига: линии — расчетные значения; \circ — экспериментальные данные

В основу калибровки компьютерной модели положены пропорциональность модельной и экспериментальной скоростей сдвига, обратно пропорциональная зависимость потенциала взаимодействия частиц и температуры, баланс взаимодействия между частицами, входящими в состав цепочечных агрегатов и частицами жидкости с использованием системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{ss}(r_{ij}, T) = 4\varepsilon_{ss}(T) \left[\left(\frac{\sigma_{ss}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ss}}{r_{ij}} \right)^6 \right]; \\ u_{ll}(r_{ij}, T) = 4\varepsilon_{ll}(T) \left[\left(\frac{\sigma_{ll}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ll}}{r_{ij}} \right)^6 \right]; \\ u_{sl}(r_{ij}, T) = 4\varepsilon_{sl}(T) \left[\left(\frac{\sigma_{sl}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{sl}}{r_{ij}} \right)^6 \right]; \\ \varepsilon_{sl} = \sqrt{\varepsilon_{ss} \varepsilon_{ll}}; \\ \sigma_{sl} = \sqrt{\sigma_{ss} \sigma_{ll}}; \\ \varepsilon_{ss}(T) = \frac{c_1}{T}; \\ \varepsilon_{ll}(T) = \frac{c_2}{T}; \\ G_p^{exp} = c_3 G_p^{sim}; \\ f(c_1, c_2, c_3, T) = \max \{ (\eta^{sim}(c_1, c_2, c_3) - \eta^{exp}(G_p^{exp}, T))^2 \} \rightarrow \min; \end{array} \right.$$

Где $u_{ss}, u_{ll}, u_{sl}, \varepsilon_{ss}, \varepsilon_{ll}, \varepsilon_{sl}, \sigma_{ss}, \sigma_{ll}, \sigma_{sl}$ — потенциал взаимодействия, глубина потенциальной ямы, расстояние нулевого потенциала взаимодействия между частицами, формирующими цепочечные агрегаты, между частицами жидкости, между частицами цепочечных агрегатов и жидкости соответственно; T — температура суспензии магнетита; η^{sim}, η^{exp} — расчетная и экспериментальная относительная вязкость суспензии; c_1, c_2, c_3 — коэффициенты, минимизирующие различие модельной и экспериментальной вязкости; G_p^{sim}, G_p^{exp} — модельная и экспериментальная скорость сдвига. Начальные значения $\varepsilon_{ss}, \sigma_{ss}$ принимались равными ε, σ из системы (2), (3).

Хорошее соответствие экспериментальной и модельной кривых вязкости наблюдается в диапазоне скорости сдвига $30 - 80 \text{ с}^{-1}$ (рис. 2). В области малых скоростей сдвига ($0 - 20 \text{ с}^{-1}$) модельная кривая точнее отражает зависимость, чем экспериментальная кривая, завышающая вязкость суспензии, что связано с несовершенством измерительной системы вискозиметра.

Возможности разработанной модели демонстрируются на примере влияния взаимодействия частиц кварца с магнетитом на структурно-механические свойства суспензии.

МОДЕЛЬ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИИ КВАРЦА И МАГНЕТИТА

Разработанная модель цепочечного агрегата магнитных частиц использовалась для исследования системы “кварц–магнетит”, соответствующей качественному составу железистых кварцитов месторождений Заимандровского железорудного района. Имитационная компьютерная модель суспензии составлялась из частиц жидкости, частиц цепочечных агрегатов и частиц, имитирующих частицы кварца, в численном соотношении $30 : 1 : 0.7$ соответственно.

Из сравнения рис. 3а и рис. 3б видно, что захват кварца агрегатами магнетита при разноименном заряде частиц приводит к уменьшению объема и слияния (коалесценции) клубков. Степени внутреннего вращения в образующемся конгломерате частиц кварца и магнетита заторможены вследствие сжатия клубков, что проявляется в увеличении расчетной вязкости суспензии. Экспериментальное исследование структурно-механических свойств суспензии кварца и магнетита показало двукратное увеличение вязкости при селективной перезарядке частиц кварца цетилтриметиламмонием, что хорошо согласуется с результатами моделирования.

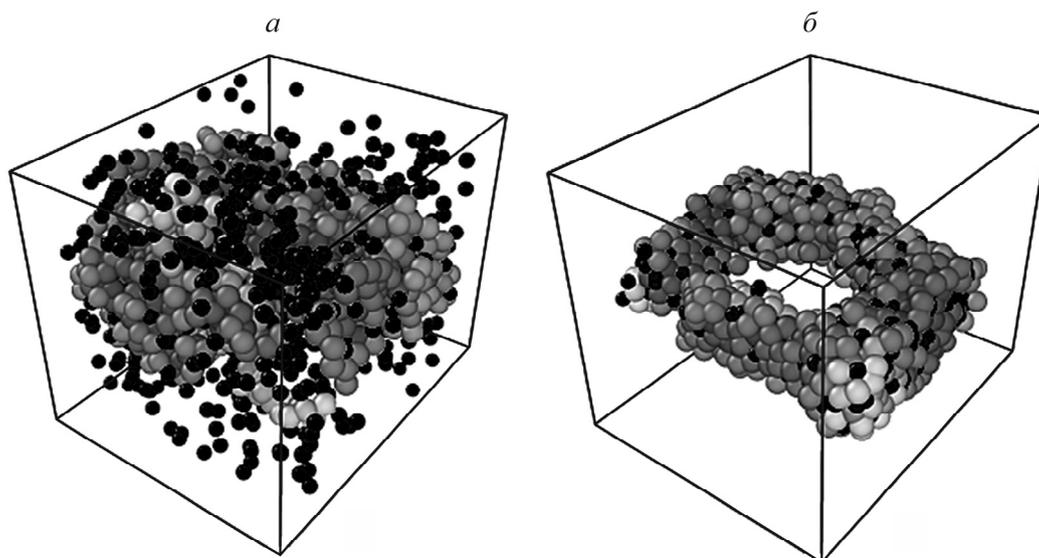


Рис. 3. Распределение в объеме модельных частиц магнетита и кварца размером 1 мкм при одноименном (а) и разноименном (б) заряде частиц, скорость сдвига соответствует 20 с^{-1} , температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$: • — модельные частицы кварца; остальные частицы — модельные частицы отдельных цепочечных агрегатов магнетита

Следует отметить перспективность применения разработанной компьютерной модели для визуализации и изучения структур агрегатов тонкодисперсных частиц минералов в качестве альтернативы микроскопическим исследованиям, выполняющимся на пределе оптического разрешения.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований выполнено обоснование и проверка численными экспериментами методологического подхода к моделированию структурно-механических свойств суспензии магнитных частиц микронного размера. Показано, что реология разбавленной суспензии магнетита в области малых скоростей сдвига определяется структурой цепочечных агрегатов магнитных диполей, что позволяет использовать магнитную суспензию в качестве тестовой для изучения взаимодействия частиц разных минералов с магнетитом по кривым вязкости и визуализации образующихся структур. Разработанная модель дает возможность экспериментально оценить энергию магнитного диполь-дипольного взаимодействия и ее зависимость от размера, формы и намагниченности частиц по кривым вязкости в области высоких скоростей сдвига суспензии магнетита и разрыва цепочечных агрегатов магнитных диполей.

Алгоритм расчета длины и состава цепочечных агрегатов частиц магнетита по коэффициенту трансляционной диффузии и характеристической вязкости суспензии применим для изучения агрегации немагнитных тонкодисперсных частиц в процессах переработки минерального сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александрова Т. Н., Чантурия А. В., Кузнецов В. В.** Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Зап. Горн. ин-та. — 2022. — № 256. — С. 517–526.
2. **Matiolo E., Couto H. J. B., Lima N., Silva K., and de Freitas A. S.** Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes, *Miner. Eng.*, 2020, No, 158. — 106608.
3. **Birat J.-P.** Society, materials, and the environment: the case of steel, *Metals*, 2020, Vol. 10, No. 3. — 331.
4. **Викторов С. Д., Кочанов А. Н.** Экспериментальное изучение закономерностей образования субмикронных частиц при разрушении горных пород // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 76–83.
5. **Чеботарев А. Г., Семенцова Д. Д.** Комплексная оценка условий труда и состояния профессиональной заболеваемости работников горно-металлургических предприятий // Горн. пром-сть. — 2021. — № 1. — С. 114–119.
6. **Lu X., Lin Y., Chen X., Shi Y., Liang R., Wang R., and Peng Z.** Environmental impact, durability performance, and interfacial transition zone of iron ore tailings utilized as dam concrete aggregates, *J. Clean. Prod.*, 2021, No. 292. — 126068.
7. **Эрикссон М., Леф А., Леф О.** Обзор мирового рынка железной руды за 2019–2020 годы // Горн. пром-сть. — 2021. — № 1. — С. 74–82.
8. **Опалев А. С., Марчевская В. В.** Исследование влияния крупности зерен магнетита на магнитную восприимчивость железорудных концентратов // ФТПРПИ. — 2023. — № 1. — С. 161–167.
9. **Остапенко С. П., Опалев А. С.** Методический подход к исследованию магнитного взаимодействия тонкодисперсных частиц в водной суспензии методом компьютерного моделирования // Горн. пром-сть. — 2023. — № 5S. — С. 142–149.
10. **Zhu Z., Wu S., Zhang C., and Zhou J.** Length measurement of chain-like structure of micron magnetic particles dispersing in carrier fluid effected by magnetic field, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 2021, No. 34. — P. 805–816.
11. **Wu H., Xu Z., Wang J., Bo X., Tang Z., Jiang S., and Zhang G.** Chain formation mechanism of magnetic particles in magnetorheological elastomers during pre-structure, *J. Magnetism Magnetic Materials*, 2021, Vol. 527. — 167693.
12. **Xu Z., Chen W., Wang T., and Li Z.** Study of self-assembly between two magnetic particle chains in magnetorheological fluids, *J. Magnetism Magnetic Materials*, 2024. — 172593.
13. **Бибик Е. Е.** Реология дисперсных систем. — Л.: ЛГУ, 1981. — 171 с.
14. **Лукичев С. В.** Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий // Горн. пром-сть. — 2021. — № 4. — С. 73–79.
15. **Nwaila G. T., Frimmel H. E., Zhang S. E., Bourdeau J. E., Tolmay L. C. K., Durrheim R. J., and Ghorbani Y.** The minerals industry in the era of digital transition: an energy-efficient and environmentally conscious approach, *Resour. Pol.*, 2022, No. 78. — 102851.

16. **Shimponda-Nawa M. and Nwaila G. T.** Integrated and intelligent remote operation centres (I2ROCs): assessing the human-machine requirements for 21st century mining operations, *Miner. Eng.*, 2024, No. 207. — 108565.
17. **Kremer G.** Dynamics of entangled linear polymer melts: A molecular-dynamics simulation, *J. Chem. Phys.*, 1990, Vol. 92. — P. 5057–5086.
18. **Морозов А. Д.** Характеристическая вязкость полимеров. методы автоматического измерения // *Лаборатория и производство*. — 2018. — № 1. — С. 106–112.
19. **Arinaitwe E. and Pawlik M.** A role of flocculant chain flexibility in flocculation of fine quartz. Part I. Intrinsic viscosities of polyacrylamide-based flocculants, *Int. J. Miner. Proc.*, 2013, Vol. 124. — P. 50–57.
20. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Гидродинамика. — М.: Физматлит, 2021. — 736 с.
21. **Mattice W. L. and Suter U. W.** Conformational theory of large molecules: The rotational isomeric state model in macromolecular systems, Wiley, New York, 1994. — 449 p.
22. **Сагар К., Сатиш К., Мандип С., Джейтиндер П. С., Джашанприт С.** Определение реологических характеристик однородных и бимодальных жидкостных пульп железной руды с помощью искусственных нейронных сетей // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 2. — С. 30–42.

Поступила в редакцию 14/XI 2024

После доработки 18/I 2025

Принята к публикации 23/I 2025