

УДК 622.693.4

**ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ ДОБАВОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ ПО ТРУБОПРОВОДУ**

**Чандан Гупта, Сатиш Кумар**

*Национальный технологический институт Джамшедпура,  
E-mail: 2019rsme010@nitjsr.ac.in, 8311014, штат Джаркханд, Индия*

Приведено детальное описание и стабилизация концентрированной суспензии железной руды (размер частиц  $\leq 75$  мкм) с помощью различных лабораторных испытаний. Рассмотрены реологические характеристики железной руды в диапазоне весовой концентрации 60–80 % при наличии и отсутствии экстракта *Sapindus mukorossi* (мыльного дерева) в качестве диспергатора. Устойчивость суспензии железной руды при наличии сапонины определяется реологическими свойствами, концентрацией диспергатора и механизмом стабилизации. Выполнен регрессионный анализ экспериментальных реологических данных при различной скорости сдвига; полученные результаты хорошо согласуются с моделью Гершеля–Балкли. Критическая мицеллярная концентрация водного экстракта диспергатора составила 0.018 г/см<sup>3</sup>. Наличие сапонины значительно улучшило смешиваемость и устойчивость суспензии железной руды. Анализ напорных потерь и удельного энергопотребления доказывает экономическую целесообразность использования поверхностно-активных веществ для транспортировки рудной пульпы по трубопроводам.

*Суспензия железной руды, стабилизация суспензии, Sapindus mukorossi (мыльное дерево) в качестве ПАВ, критическая мицеллярная концентрация, реологическое моделирование*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230207

Трубопроводная транспортировка — экономически целесообразное решение по перемещению руды от шахты до отдаленных обогатительных комбинатов [1, 2]. Горнорудная промышленность нуждается в вариантах транспортировки руды, в которых будет снижено потребление воды и повышено содержание твердого вещества в пульпе [3–5]. Делались попытки повысить нагрузочную характеристику твердых веществ путем применения поверхностно-активного вещества (ПАВ), диспергаторов и органических полимеров в качестве добавок. Повторное измельчение железорудного концентрата улучшает поведение потока пульпы и диспергирующую способность [6], микроволновая обработка повышает текучесть пульпы [7]. Характер взаимодействия добавок с твердыми частицами влияет на поведение потока пульпы; наибольшее влияние оказывает выбор ПАВа. Для изучения характеристик потока железорудной пульпы использовались химические добавки, такие как гашеная известь, негашеная известь, актигель и гексаметафосфат натрия [8]. С целью улучшения поведения потока мелкозернистой железорудной пульпы применялись следующие диспергаторы: силикат натрия (СН), этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТК), пирофосфат натрия (ПФН) и гексаметафосфат натрия (ГМФН) [9]. Полимерные ПАВы повышают текучесть среднеплотных феррокремниевых, магнетитных и DAV глинистых суспензий [10]. Выбор определенного грансостава твердой фазы влияет на поведение потока суспензии [11, 12].

При увеличении температуры повышается текучесть, так как снижается вязкость пульпы [13, 14]. Вязкость, или сопротивляемость течению, прямо пропорциональна концентрации твердого вещества в пульпе [15, 16]. Устойчивость и вязкость — наиболее важные параметры пульпы с высокой концентрацией твердого вещества. Взаимосвязь между вязкостью и устойчивостью может быть улучшена применением диспергирующих веществ [17, 18]. Некоторые исследователи рассматривали влияние натуральных добавок на водно-угольную суспензию [19, 20], другие — применение химических добавок с целью улучшения сочетания устойчивости и высокой концентрации твердого вещества [21–23]. Также исследовались смеси химических и натуральных добавок для улучшения реологического поведения и устойчивости концентрированных суспензий, таких как угольные и зольные [24–26].

Влияние напряжения сдвига и деформации на снижение вязкости, поведение суспензии при транспортировке и устойчивость водно-угольных суспензий детально изучено, так же как и механизм взаимодействия добавок и пульпы [27–30]. Наиболее распространенными добавками для повышения смешиваемости суспензии являются ионные, неионные, полимерные добавки либо их смеси [31, 32]. В [33, 34] рассмотрена молекулярная структура и дисперсионная способность сапонины, извлеченной из *Sapindus mukorossi* (мыльное дерево). Добавление диспергатора снижает вязкость пульпы, вызывает стерическое или электростатическое отталкивание, а также воздействует на поверхность “частица–частица” и “жидкость–частица” [35–37]. В [38] показано влияние двух биодобавок, полученных из *Basella alba* (базелла белая) и *Jatropha gossypifolia* Linn (ятрофа хлопчатниковидная) на железорудную пульпу с массовой концентрацией руды 60–75 % [38]. Выявлено, что указанные добавки улучшают текучесть и устойчивость пульпы. Натуральные добавки могут быть подходящим решением для стабилизации железорудной пульпы, исходя из экономических и экологических аспектов.

В научной литературе имеется несколько работ, посвященных влиянию химических добавок на поведение железорудной пульпы. Однако использование природных ПАВов в приготовлении высококонцентрированной пульпы до конца не изучено. В настоящей работе использован диспергатор растительного происхождения из мыльного дерева. Для применения натуральных добавок в железорудную пульпу в промышленных масштабах необходимо исследовать их физические, химические и реологические характеристики. Рассмотрено влияние натуральной добавки, извлеченной из мыльного дерева, на смешиваемость высококонцентрированной железорудной пульпы. Измерены различные факторы транспортировки пульпы, такие как форма, размер, удельный вес, распределение частиц по размеру, концентрация руды, pH, максимальная скорость осаждения и поведение потока. Изучено влияние температуры на реологическое поведение при различных значениях концентрации руды. Для измерения критической мицеллярной концентрации (КМК) проведено испытание поверхностного натяжения. Дана оценка влиянию концентрации сапонины на предел текучести. Для изучения взаимодействия между частицами при различных концентрациях сапонины измерен дзета-потенциал. Для оценки природы реологических свойств выполнен регрессионный анализ.

#### МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Сбор и подготовка образцов.* Железная руда для проведения экспериментальных исследований предоставлена компанией Amalgam Steel Private Limited (Индия). Образцы сырой руды измельчены лабораторной шаровой мельницей. Требуемый размер частиц железной руды получен с помощью просеивания на вибросите. Для проведения реологических испытаний при различных концентрациях руды подготовлены разные образцы пульпы с объемом воды 100 мл в качестве растворителя. На протяжении 2 мин фиксировались различные реологические параметры при линейном повышении градиента сдвига и температуре 30 °С. С целью избежания

инструментальных ошибок измерения перед каждым испытанием весь инструмент и мерная колба были вымыты и высушены. Испытания повторялись несколько раз для обеспечения безошибочных измерений реологических свойств и получения повторяющихся значений.

*Физико-химические свойства образцов железной руды.* Распределение частиц по размеру определяется путем измерения дисперсии размера частиц и фракционного состава частиц, составляющих твердое вещество образцов. Распределение частиц по размеру образцов железной руды рассчитано на основе фракционного анализа и с помощью анализатора размера частиц Anton Paar PSA 1190 (Австрия). Максимальная концентрация осажденных частиц является функцией специфической плотности материала и концентрации твердых веществ в пульпе [39]. Значение максимальной концентрации осаждения (МКО) необходимо для анализа протекания пульпы по трубопроводу и экономически эффективного проектирования пульпопроводов [40]. МКО частиц железной руды оценивалась гравитационным методом, специфическая плотность образцов железной руды — с помощью пикнометра. Химические свойства суспензии существенно влияют на ее устойчивость. Значение pH транспортируемого полезного ископаемого обуславливает устойчивость суспензии [41], а значения pH пульпы при различных концентрациях руды получены с помощью цифрового pH-метра.

*Морфологический состав образцов железной руды.* Морфологический анализ образцов железной руды выполнен с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (EDX) на установке JEOL 6510LV (Япония). В высоком разрешении получена структура поверхности, отражающая морфологическое поведение образцов железной руды. EDX-анализом выявлено распределение различных веществ, входящих в состав образца железной руды. Характерные точки пиков позволяют сделать вывод о составе и поверхностной топографии образца. Железные руды демонстрируют амфипатическую природу в зависимости от состава [42, 43]. Минералогические характеристики железных руд зависят от места добычи и влияют на смешиваемость суспензий.

*Извлечение сапонина из мыльного дерева.* Плоды мыльного дерева, известные как мыльные ягоды или мыльные орехи, собраны в восточном прибрежном регионе Индии. Собранные плоды высушивали, размалывали и растворяли в воде при соотношении 1:9. Затем раствор перемешивали в течение 4 ч на большой скорости в магнитном миксере и отжимали на центрифуге в течение 1 ч. Так как в рамках исследуемого метода не используются химикаты, была собрана и отфильтрована жидкая составляющая, которая представляла собой водный экстракт сапонина.

*Определение критической мицеллярной концентрации.* Для анализа поверхностного натяжения водного экстракта ПАВа использовался тензиометр DCAT-21, Dataphysics (Германия). Поверхностное натяжение чистой воды составляет 72.74 мН/м и достигает минимального значения (44 мН/м) при концентрации сапонина 0.018 г/см<sup>3</sup>. Такая концентрация сапонина называется критической мицеллярной концентрацией (КМК) ПАВа. Для оценки поверхностного натяжения при различных концентрациях сапонина применялся метод пластины Вильгельми.

*Определение реологических характеристик образца пульпы.* Образцы пульпы железной руды экспериментально исследовались на модульном портативном реометре Anton Paar MCR 92 (Австрия). Набор оборудования состоял из концентричной цилиндрической системы, в которую входила мерная колба C-CC39/T200/XL диаметром 42 мм, и цилиндрического грузика В-CC27 диаметром 26.5 мм и длиной 40 мм.

*Аппроксимация реологических свойств.* Аппроксимирующая модель реологических свойств позволяет получить информацию о поведении жидкостей. На основе полученных экспериментальных данных исследовались три модели для проверки их эффективности (реологическая модель Оствальда де Ваала (показательная модель), модель Гершеля–Балкли, модель вязкопластического тела Бингама):

$$\tau = k\gamma^n, \quad (1)$$

$$\tau = \tau_{y,h} + k\gamma^n, \quad (2)$$

$$\tau = \tau_{y,b} + k_b\gamma, \quad (3)$$

где  $\tau_y$  — предел текучести;  $\gamma$  — степень деформации сдвига;  $k$  — индекс поведения потока;  $n$  — индекс однородности.

**Анализ дзета-потенциала.** Электрокинетический потенциал представляет собой характеристику электростатического притяжения или отталкивания заряженных частиц в суспензии или в пульпе. Электрофоретическая подвижность заряженных частиц измеряется через дзета-потенциал. Магнитуда дзета-потенциала определяет оптимальный состав суспензии или пульпы [44–46]. Также этот параметр используется для прогнозирования оптимального количества дисперсионной фазы и диспергирующей среды в коллоидной суспензии. Дзета-потенциал смеси пульпы с добавками определяется анализатором размера частиц Litesizer 500 Anton Paar (Австрия). Образцы для определения дзета-потенциала подготавливаются смешиванием 1 г железной руды и 100 мл деионизированной воды. Далее раствор перемешивается магнитным миксером при комнатной температуре в течение 15 мин. Испытания 1 мл раствора выполнялись трижды для избежания ошибок измерения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Основные физико-химические свойства железной руды.** Анализ распределения частиц по размеру показал, что диаметр частиц в образце меньше 75 мкм; 83.21 % от общего количества частиц имели диаметр меньше 53 мкм, а 68.08 % меньше 38 мкм. Распределение частиц железной руды по размеру показано на рис. 1а. Размеры частиц образца железной руды при  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  и  $d_{90}$  составили 2.3, 18.63 и 59.5 мкм соответственно.

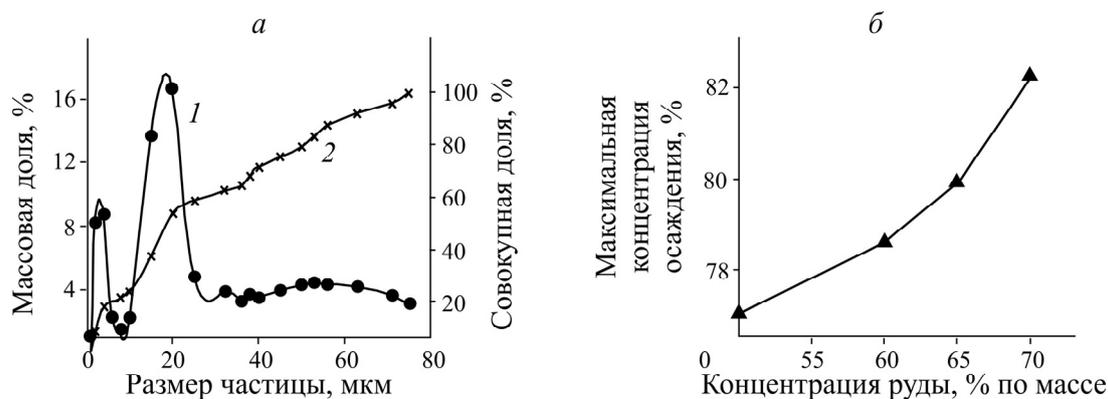


Рис. 1. Распределение диаметров частиц в образце железной руды по размеру (а) и зависимость максимального осаждения от концентрации руды в образце (б); 1 — массовая доля; 2 — совокупная доля

Специфическая плотность вещества — основной фактор, определяющий максимальную концентрацию осаждения (МКО) в суспензии. Для оценки специфической плотности железной руды использовался стандартный пикнометр; специфическая плотность образца составила 4.714 г/см<sup>3</sup>. На рис. 1б показана зависимость МКО от общей концентрации руды в пульпе в диапазоне 50–70 % по массе. Для определения МКО при различных значениях концентрации руды применялся гравитационный метод. Значение МКО достигается спустя 24 ч. Время осаждения раствора до достижения статического уровня составляет 25–30 мин, после чего наблюдаются номинальные изменения при измерении цилиндрического уровня. При весовой концентрации руды 70 % значение МКО образца составило 82.256 %.

Ниже представлено влияние концентрации руды на значение рН образца железной руды:

Концентрация руды $C_w$ , %	60	65	70	75	78	80
рН	6.35	6.28	6.22	6.17	6.12	6.08

Изменения рН показали, что пульпа железной руды является кислой средой и ее кислотность увеличивается при больших концентрациях.

*Морфологические характеристики.* На рис. 2а представлены SEM-изображения железной руды при увеличении 2000. Видно, что частицы железной руды имеют волокнистую и гранулярную форму. На рис. 2б приведена EDX-спектрограмма образца железной руды. Элементы, входящие в состав образца, количественно определены на основе расположения пиков на спектрограмме. EDX-анализом подтверждено, что железо — основной компонент образца.

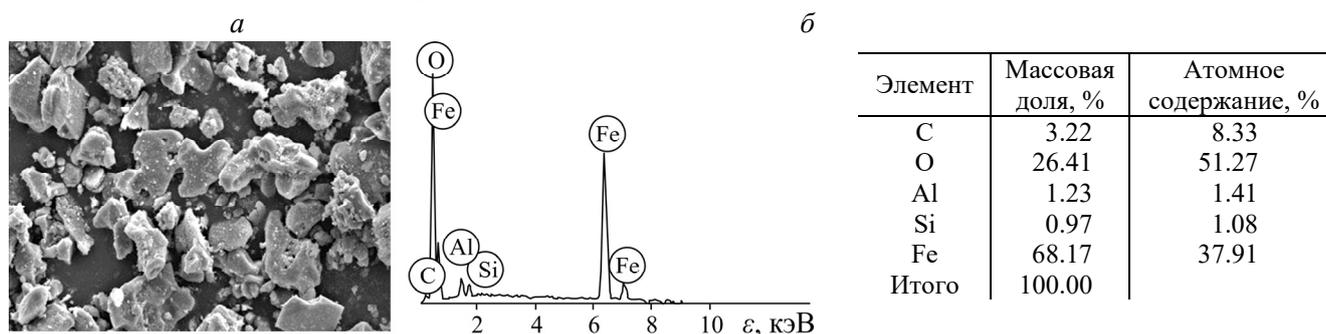


Рис. 2. Морфологическая структура образца железной руды: а — SEM-изображение, б — EDX-спектрограмма

*Поверхностная активность мыльного дерева.* Когда частица железной руды взаимодействует с молекулой сапонина, возникает стерический барьер и/или электростатическое отталкивание. Способность диспергатора связывать поверхность железной руды является ключевой в процессе стабилизации пульпы. ПАВы в растворе снижают поверхностное трение. Так как концентрация диспергатора увеличивается, поверхностное натяжение растворителя постепенно снижается. Критическая мицеллярная концентрация (КМК) диспергатора составляет 0.018 г/см<sup>3</sup> (рис. 3).

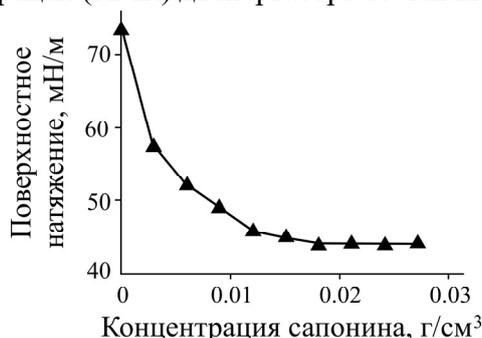


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора мыльного дерева от концентрации сапонина

Количество адсорбируемого диспергатора коррелирует с силами ван-дер-ваальсова взаимодействия между молекулами железной руды. Адсорбция сапонина между железной рудой и водой обеспечивает поверхностную гидрофобность, исключая приближение отдельных слоев из-за стерических барьеров, сформированных головными группами сапонина. В результате постепенно снижается связность между частицами и вязкость пульпы. Тем не менее при достижении КМК в растворе отдельные момеры сапонина начинают образовывать мицеллы. В этом случае снижается активность мономеров и прекращается адсорбция между железной рудой и водой.

Соотношение между напряжением сдвига и скоростью сдвига. На рис. 4 приведено соотношение между напряжением сдвига и скоростью сдвига при различных концентрациях. Рассмотрено поведение потока пульпы железной руды с добавлением и без добавок при различных концентрациях руды: 60, 65, 70 и 75 % в диапазоне скорости сдвига 1–600 1/с. При всех значениях концентрации, когда повышается скорость сдвига, происходит увеличение напряжения сдвига, показывая, что поток обладает неньютоновским поведением с низким пределом текучести. При высоких скоростях сдвига кривые предела текучести подчиняются показательному закону и могут быть построены с помощью модели Гершеля–Балкли. Добавление сапонины снижает напряжение сдвига суспензии, что улучшает поведение потока пульпы.

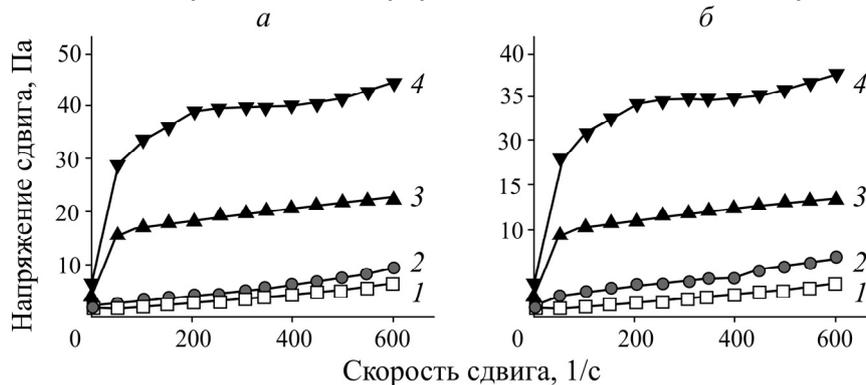


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига: а — без добавления сапонины; б — с добавлением сапонины; 1 — 60%; 2 — 65%; 3 — 70%; 4 — 75 %

Влияние концентрации сапонины на эффективную вязкость. На рис. 5 представлена корреляция между вязкостью и скоростью сдвига при различных концентрациях железной руды с/без сапонины.

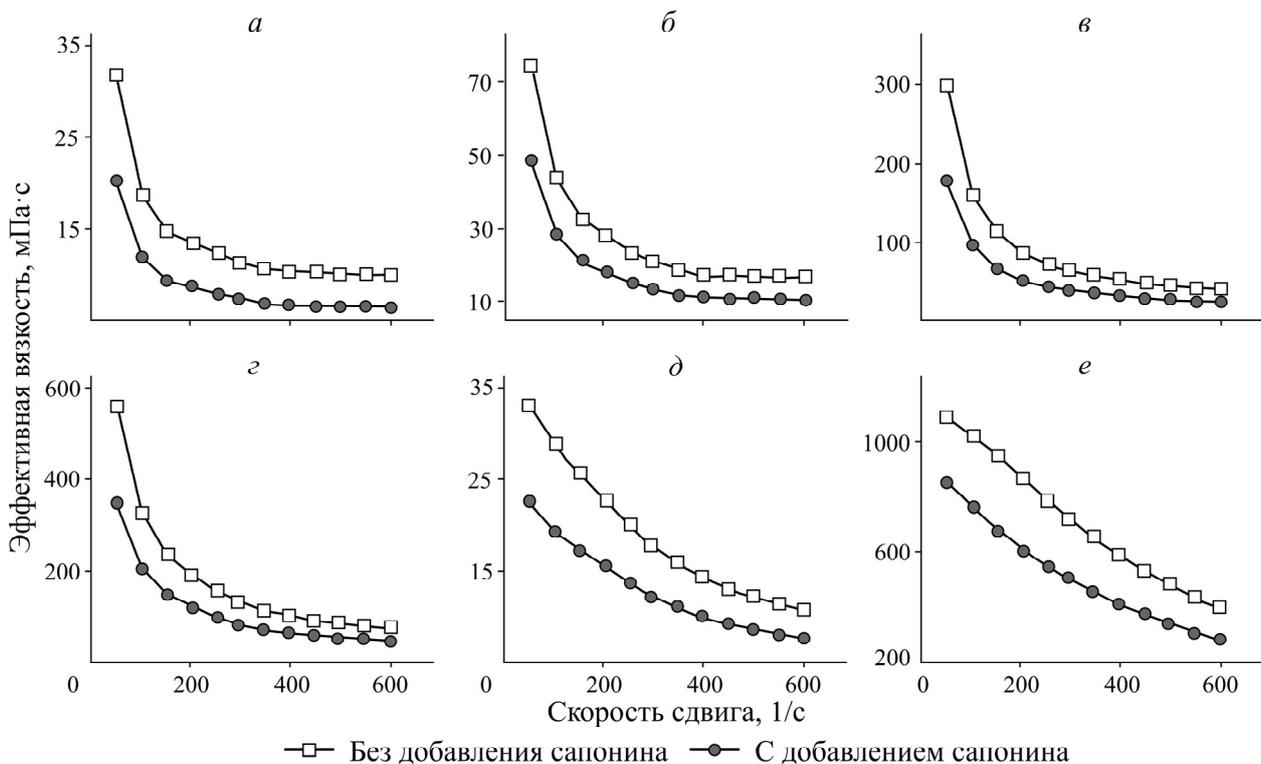


Рис. 5. Зависимость реологического поведения железорудной пульпы от скорости сдвига при различной концентрации руды, %: 60 (а); 65 (б); 70 (в); 75 (г); 78 (д); 80 (е)

Концентрация железной руды изменялась от 60 до 80 %, концентрация сапонины поддерживалась на значении КМК  $0.018 \text{ г/см}^3$ , а скорость сдвига изменялась в диапазоне 50–600  $1/\text{с}$ . Добавление сапонины в пульпу значительно снижает эффективную вязкость при всех значениях концентрации. Возможно, снижение эффективной вязкости связано со снижением агломерации частиц и низкими силами ван-дер-ваальсова взаимодействия между частицами железной руды в пульпе.

*Влияние концентрации твердого вещества на эффективную вязкость.* На рис. 6а приведена зависимость эффективной вязкости пульпы от концентрации руды, которая изменялась в диапазоне 60–80 %. Результаты испытаний показали, что в диапазоне концентрации 60–75 % пульпа обладает отличной текучестью, однако при достижении концентрации 78 % текучесть резко снижается, а ее вязкость увеличивается. При концентрации руды в пульпе 80 % отмечаются низкие характеристики потока. Это происходит из-за снижения объемной доли воды в пульпе, в результате чего увеличивается площадь контакта между частицами. Также при высоких концентрациях возникают агломерации частиц из-за сил Ван-дер-Ваальса.

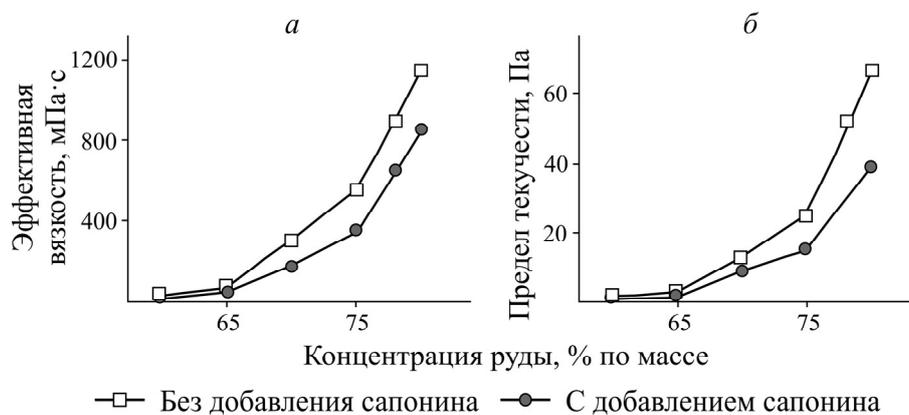


Рис. 6. Зависимость эффективной вязкости пульпы (а) и предела текучести (б) от концентрации руды

*Влияние концентрации руды и наличия сапонины на предел текучести.* Предел текучести — одна из прочностных характеристик материала, она определяет наименьшее напряжение, необходимое для потока материала. Количественная оценка предела текучести выполнена с помощью регрессионного метода. Влияние концентрации руды на предел текучести пульпы показано на рис. 6б. Испытания проведены при концентрациях 60, 65, 70, 75 и 80 %. Изучение влияния сапонины выполнено при его оптимальной концентрации (КМК) —  $0.018 \text{ г/см}^3$ . Добавление сапонины привело к снижению предела текучести при всех значениях концентрации руды. Такое снижение может быть обусловлено снижением агломерации между частицами железной руды.

*Влияние температуры на эффективную вязкость.* Вязкость жидкости и ее текучесть — коррелируют между собой. Эффективная вязкость при заданной скорости сдвига зависит от температуры экспоненциальным образом. На рис. 7а показано влияние температуры на вязкость суспензий с добавлением сапонины и без него. Видно экспоненциальное снижение вязкости при увеличении температуры, что может быть обусловлено повышением кинетической энергии частиц железной руды и снижением притяжения между ними. Из-за повышенной активности частиц, вызванной увеличением температуры, не образуется агломерация частиц.

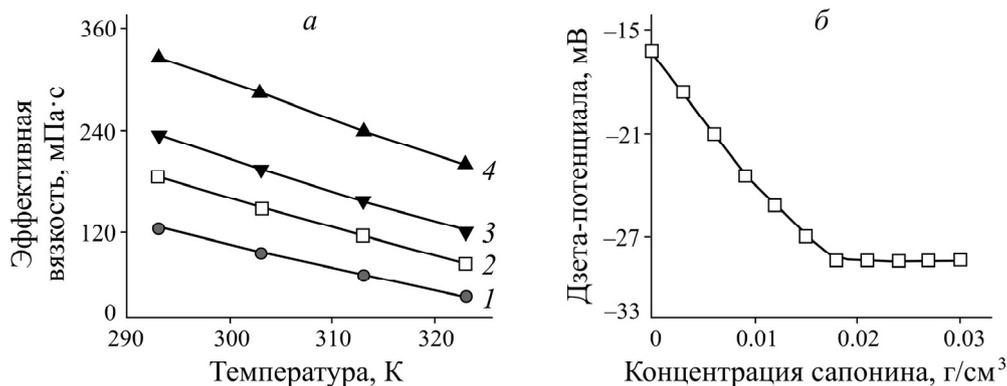


Рис. 7. Зависимость вязкости железорудной пульпы (а) от температуры и дзета-потенциала (б) от концентрации сапони́на: 1, 3 — 70, 75 % (с добавлением сапони́на); 2, 4 — 70, 75 % (без добавления сапони́на)

*Анализ дзета-потенциала.* Дзета-потенциал определяет интенсивность электростатического притяжения или отталкивания между заряженными частицами в эмульсии или суспензии. Дзета-потенциал водной суспензии железной руды без добавок составляет примерно  $-16.2$  мВ. На рис. 7б показано влияние концентрации сапони́на на дзета-потенциал водной суспензии железной руды. Магнитуда дзета-потенциала снижается при повышении содержания сапони́на и становится постоянной (около  $-28.4$  мВ) при достижении оптимальной концентрации сапони́на. Снижение дзета-потенциала подтвердило, что стабилизация водной суспензии железной руды связана с электростатическим отталкиванием между частицами руды.

*Моделирование реологического поведения пульпы железной руды.* Рассмотрена применимость моделей к экспериментальным данным. Полученные характеристики потока водной суспензии железной руды проанализированы с помощью аппроксимации эмпирическими моделями. Параметры каждой регрессионной модели определены таким образом, чтобы отражался тренд кривой экспериментальных данных. На рис. 8 представлены результаты моделирования реологических данных суспензии железной руды при концентрации руды 70 % с добавлением сапони́на. Регрессионный анализ показал, что наиболее близкая аппроксимирующая кривая к экспериментальным данным при всех концентрациях получена моделью Гершеля – Балкли.

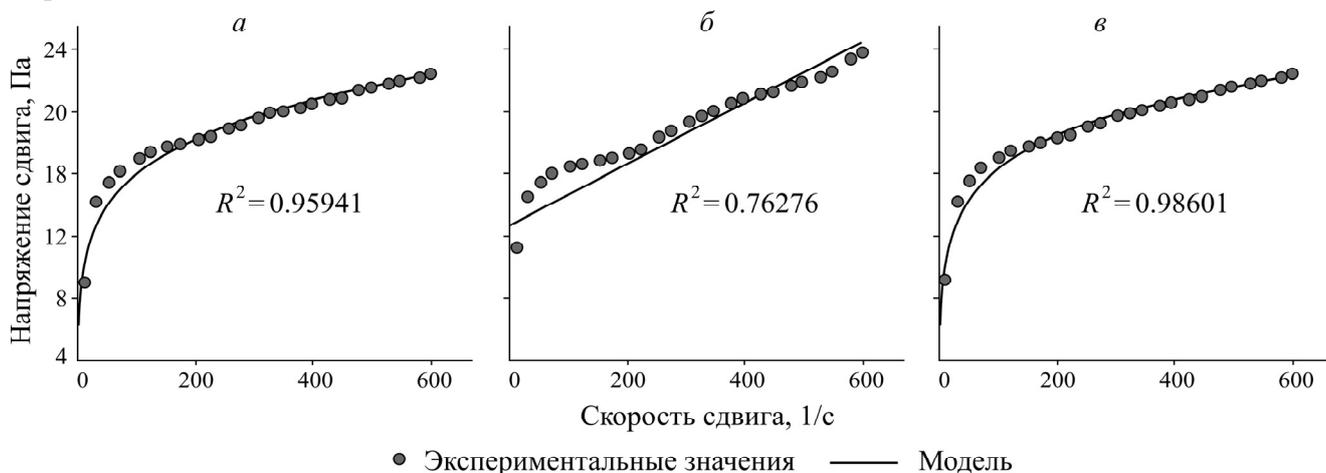


Рис. 8. Аппроксимация реологических экспериментальных данных при концентрации руды 70 %: а — показательная модель Оствальда; б — модель вязкопластического тела Бингама; в — модель Гершеля – Балкли

Динамическая вязкость и предел текучести пульпы железной руды могут быть определены с помощью моделирования реологического профиля тремя моделями, т. е. моделью Бингама, степенной моделью и моделью Гершеля – Балкли.

Результаты моделирования приведены в таблице. Видно, что при различных концентрациях в модели Гершеля – Балкли  $R^2$  почти равен 1. Можно сделать вывод, что данная модель является наиболее подходящей для прогнозирования реологического профиля водной суспензии железной руды при высокой концентрации.

Реологические параметры различных аппроксимирующих моделей

Реологическая модель	Показательная модель Оствальда			Модель Бингама			Модель Гершеля – Балкли			
	$C_w$	$k$	$n$	$R^2$	$\tau_{y,b}$	$k_b$	$R^2$	$\tau_{y,b}$	$k$	$n$
60	0.0416	0.7479	0.9702	0.6358	0.0074	0.9948	0.7419	0.0041	1.0895	0.9956
65	0.069	0.7291	0.9486	1.0433	0.0107	0.9856	1.3925	0.0024	1.2285	0.9906
70	3.5511	0.2621	0.9594	8.8872	0.0196	0.7627	8.2271	3.3956	0.2674	0.9860
75	6.4288	0.2107	0.9531	12.7289	0.0942	0.8258	14.7903	19.1305	0.1301	0.9884
80	22.7265	0.1966	0.9393	43.2695	0.3733	0.7067	38.8738	51.2277	0.0840	0.9714

*Механизм стабилизации.* Дисперсия заряженных ионов в системе индуцирует отталкивание частиц, регулируемое механизмом электростатической стабилизации. Система считается стерически устойчивой, когда диспергирующий реагент покрывает поверхность частицы [27]. Снижение дзета-потенциала подтвердило, что стабилизация водной суспензии железной руды связана с электростатическим отталкиванием между частицами руды. Поверхность частицы железной руды в основном амфипатична. В настоящем исследовании железорудная пульпа демонстрирует гидрофильную природу. Наиболее возможным механизмом адсорбции сапонины на поверхности железной руды является адсорбция полярной углеводной цепи на поверхности частицы и взаимодействие неполярного тритерпенового кольца с молекулами воды. Когда молекула сапонины сцепляется с поверхностью железной руды, происходит дегидрирование молекул железной руды из-за наличия углеводной цепи. Данный цикл продолжается до тех пор, пока концентрация сапонины не достигнет значения КМК. Это обеспечивает взвешенное состояние частиц и снижает площадь контакта между частицами железной руды. Эффективная вязкость, предел текучести и устойчивость пульпы зависят от интенсивности заряда на поверхности железной руды. Сильное электростатическое отталкивание между твердыми коллоидальными частицами предотвращает агломерацию/коагуляцию частиц и обеспечивает их хорошую дисперсию.

*Оценка напорных потерь и удельного энергопотребления при транспортировке железорудной пульпы по трубопроводу.* При проектировании трубопровода для транспортировки пульпы оценка напорных потерь выполняется на основе реологических свойств. Для оценки напорных потерь для проектируемой системы транспортировки пульпы используются такие реологические переменные, как предел текучести, индекс потока, индекс равномерности. Удельное энергопотребление (УЭП) характеризует экономическую значимость использования ПАВов. В [47] предложено уравнение для определения напорных потерь псевдопластичной жидкости на основе показательного предположения:

$$\text{Re} = \frac{D^{n'} U^{2-n'} \rho_m}{12n'^{-1} K'} \quad (4)$$

$$n' = \frac{n(1-\xi)(n\xi + n + 1)}{1 + n + 2n\xi + 2n^2\xi^2} \quad (5)$$

$$K' = \frac{\tau_y + k\left(\left(2n' + \frac{1}{3}n'\right)\dot{\gamma}Nw\right)^n}{(\dot{\gamma}Nw)^{n'}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{(n')^{0.75}} \log \left[ \text{Re}(f)^{1-\frac{n'}{2}} \right] - \frac{0.395}{(n')^{1.2}} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2f\rho_m U^2}{D} \quad (8)$$

где  $n, k, \tau_y$  — индексы потока Гершеля–Балкли;  $n', K'$  — показательные индексы;  $D$  — диаметр трубопровода (100 мм);  $\rho_m$  — плотность пульпы;  $\Delta P$  — напорные потери;  $U$  — скорость потока пульпы;  $f$  — коэффициент трения;  $\xi$  — соотношение сдвига;  $L$  — заданная длина трубопровода.

На рис. 9 представлены напорные потери железорудной пульпы с добавлением сапонины в оптимальной концентрации и без него. Напорные потери исследованы при изменении скорости потока от 1 до 3 м/с и при концентрации руды 60–80%. Наибольшая скорость увеличения напорных потерь зафиксирована при концентрациях 78 и 80%. Максимальное значение напорных потерь наблюдалось при концентрации руды 80% и скорости потока 3 м/с. Несмотря на добавление сапонины, напорные потери увеличиваются при повышении скорости потока и концентрации руды. Тем не менее при добавлении сапонины они ниже, чем без него.

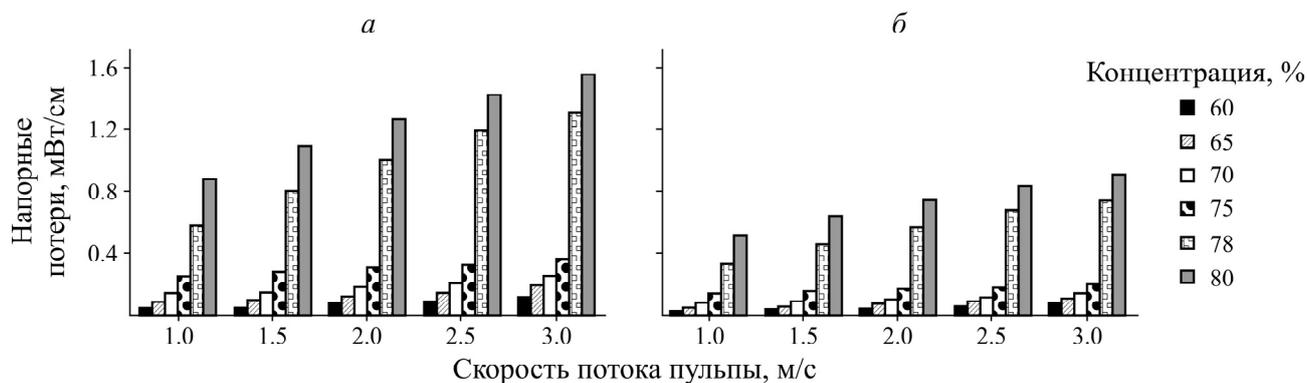


Рис. 9. Зависимость напорных потерь от скорости потока пульпы: *a* — без добавления сапонины; *б* — с добавлением сапонины

Удельное энергопотребление является критической величиной при транспортировке пульпы трубопроводом [48]. Оно определяет количество энергии, необходимое для транспортировки единицы массы твердого материала на единицу расстояния. Рассмотрим УЭП через гидравлическую мощность насоса, необходимую для транспортировки 1 т руды на 1 км трубопровода:

$$SEC = \frac{P_h}{F_s} \quad (9)$$

$$P_h = \frac{Q\rho_{mv}g\Delta P}{3.6 \cdot 10^6}, \quad (10)$$

$$F_s = Q\rho_m C_w, \quad (11)$$

где SEC — удельное энергопотребление;  $P_h$  — гидравлическая мощность;  $F_s$  — расход потока пульпы;  $C_w$  — концентрация руды в пульпе.

На рис. 10 показано удельное энергопотребление железорудной пульпы при наличии сапони́на в оптимальной концентрации и при его отсутствии. УЭП рассмотрено при различных значениях скорости потока и в диапазоне концентрации руды от 60 до 80%. Выявлено, что УЭП увеличивается при повышении скорости потока и концентрации руды в пульпе. Максимальное значение УЭП получено при 3 м/с и 80%. При добавлении сапони́на в пульпу также замечено увеличение УЭП при повышении скорости и концентрации, однако значения УЭП меньше, чем в случае без добавления сапони́на.

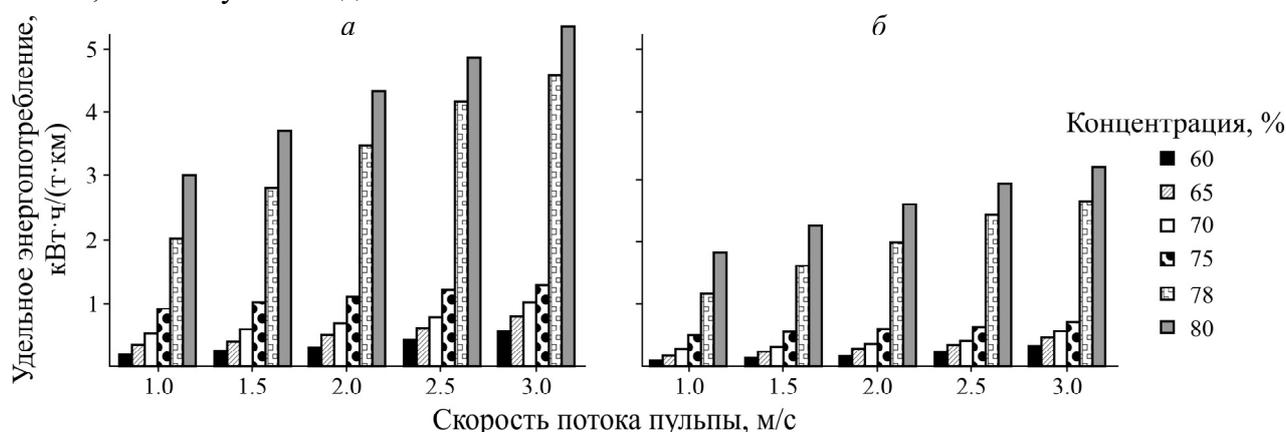


Рис. 10. Зависимость удельного энергопотребления от скорости потока железорудной пульпы: а — без добавления сапони́на; б — с добавлением сапони́на

Напорные потери и удельное энергопотребление — важные параметры при добавлении добавок в железорудную суспензию. При добавлении оптимального количества сапони́на в суспензию снижаются напорные потери. Это означает, что мощность, требуемая для преодоления напорных потерь, уменьшилась почти на 50%. Добавление сапони́на в оптимальной концентрации также снижает значение УЭП для рассматриваемого трубопровода. В результате снижаются затраты на транспортировку железной руды по трубопроводу.

## ВЫВОДЫ

Трубопроводная транспортировка железной руды от отдаленно расположенных шахт до сталелитейного комбината — экономически эффективный и экологичный процесс. Рассмотрено влияние натуральных добавок на реологические характеристики пульпы с высокой концентрацией руды. Для повышения смещиваемости железорудной суспензии использован водный экстрагированный сапони́н из *Sapindus Mukorossi* (мыльное дерево). Определен максимальный стабилизирующий эффект сапони́на при значении критической мицеллярной концентрации  $0.018 \text{ г/см}^3$ , который повышает диспергирующую способность и устойчивость железорудной пульпы. Наличие сапони́на из мыльного дерева в пульпе значительно повысило способность железорудных частиц к смачиванию за счет снижения поверхностного натяжения. Снижение дзета-потенциала с  $-16.2$  до  $-28.4 \text{ мВ}$  показало, что стабилизация водной железорудной пульпы связана со стерическим отталкиванием между частицами руды. Выявлено,

что модель Гершеля–Балкли — наиболее подходящая для описания поведения потока водной суспензии железной руды при высоких концентрациях. Снижение напорных потерь и удельного энергопотребления показало, что добавление сапона из мыльного дерева в высококонцентрированную железорудную пульпу является эффективным способом для ее транспортировки при наименьших энергозатратах.

Авторы выражают благодарность компании Amalgam Steel Private Limited (Индия) за предоставление сырой железной руды для проведения данного исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Usui H., Li L., and Suzuki H.** Rheology and pipeline transportation of dense fly ash-water slurry, *Korea-Australia Rheology J.*, 2001, Vol. 13, No. 1. — P. 47–54.
2. **Paterson A. J. C.** Pipeline transport of high density slurries: a historical review of past mistakes, lessons learned and current technologies, *Min. Technol.*, 2012, Vol. 121, No. 1. — P. 37–45.
3. **Thomas A. D. and Cowper N. T.** The design of slurry pipelines—historical aspects, In *Proc. Hydrotransport*, 2017, Vol. 20. — P. 7–22.
4. **Cruz N., Forster J., and Bobicki E. R.** Slurry rheology in mineral processing unit operations: A critical review, *The Canadian J. Chemical Eng.*, 2019, Vol. 97, No. 7. — P. 2102–2120.
5. **Silva R. C.** Experimental characterisation techniques for solid-liquid slurry flows in pipelines: A Review, *Proc.*, 2022, Vol. 10, No. 3. — P. 597.
6. **Vieira M. G. and Peres A. E. C.** Effect of rheology and dispersion degree on the regrinding of an iron ore concentrate, *J. Mater. Res. Technol.*, 2013, Vol. 2, No. 4. — P. 332–339.
7. **Sahoo B. K., Das T. K., Gupta A., De S., Carsky M. and Meikap B. C.** Application of response surface analysis to iron ore slurry rheology using microwave pre-treatment, *South African J. Chemical Eng.*, 2017, Vol. 23, No. 1. — P. 81–90.
8. **Melorie A. K. and Kaushal D. R.** Experimental investigations of the effect of chemical additives on the rheological properties of highly concentrated iron ore slurries, *KONA Powder and Particle J.*, 2018, Vol. 35. — P. 186–199.
9. **Abro M. I., Pathan A. G., Andreas B., and Mallah A. H.** Effect of various parameters on the dispersion of ultra fine iron ore slurry, P. 2, *Pakistan J. Analytical and Env. Chemistry*, 2010, Vol. 11, No. 2. — P. 5.
10. **Mabuza N. T., Pocock J., and Loveday B. K.** The use of surface active chemicals in heavy medium viscosity reduction, *Minerals Eng.*, 2005, Vol. 18 — P. 25–31.
11. **Kumar S., Singh M., Singh J. et al.** Rheological characteristics of Uni/Bi-variant particulate iron ore slurry: artificial neural network approach, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55. — P. 201–212.
12. **Singh H., Kumar S., Mohapatra S. K., Prasad S. B., and Singh J.** Slurryability and flowability of coal water slurry: Effect of particle size distribution, *J. Cleaner Prod.*, 2021, Vol. 323. — P. 129183.
13. **Mosa E. S., Saleh A. M., Taha A. T., El-Molla A. M., and Abdel-Rasoul E. I.** A study on the Effect of slurry temperature, slurry pH and particle degradation on rheology and pressure drop of coal water slurries, *J. Archive*, 2021, Vol. 49.
14. **Shkuratnik V. L., Kravchenko O. S., and Filimonov Y. L.** Stresses and temperature affecting acoustic emission and rheological characteristics of rock salt, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55. — P. 531–537.
15. **Singh M., Kumar S., Kumar S., Nandan G., and Gupta M.** Characterisation of iron-ore suspension at in-situ conditions, *Materials today: proc.*, 2018, Vol. 5, No. 9. — P. 17845–17851.

16. **Anushenkov A. N., Rostovtsev V. I., and Frizorger V. K.** Modification of coal tar pitch in hydropercussion-cavitation field, *J. Min. Sci.*, 2009, Vol. 45. — P. 509.
17. **Lavrinenko A. A. and Gol'berg G. Y.** Flow Regime of mineral suspensions with preserved structure of flocs, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55. — P. 437–443.
18. **Svarovsky L. and Thew M. T. eds.** Hydrocyclones: analysis and applications (Vol. 12), Springer Science & Business Media, 1992.
19. **Senapati P. K., Das D., Nayak A., and Mishra P. K.** Studies on preparation of coal water slurry using a natural additive, *Energy Sources, Part A*, 2008, Vol. 30, No. 19. — P. 1788–1796.
20. **Routray A., Das D., Parhi P. K., and Padhy M. K.** Characterisation, stabilisation, and study of mechanism of coal-water slurry using S apindous Mukorossi as an additive, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilisation, and Env. Effects*, 2018, Vol. 40, No. 20. — P. 2502–2509.
21. **Assefa K. M. and Kaushal D. R.** The influence of chemical additives on the flow behaviours of solid-liquid suspensions: a review, In *Conference Proc. of RACEE-2015, Int. J. Eng. Res. Technol.*, 2015, Vol. 4. — P. 180–185.
22. **Khamzina T. A. and Kondrat'ev S. A.** Activity of different chemistry agents in flotation of difficult slack coal, *J. Min. Sci.*, 2021, Vol. 57. — P. 645–653.
23. **Kumar S.** Determination of pressure drop characteristics of fly ash suspension with additive for hydraulic transportation, *J. of Applied Fluid Mech.*, 2018, Vol. 11, No. 5. — P. 1387–1393.
24. **Routray A., Senapati P. K., Padhy M., and Das D.** Effect of mixture of natural and synthetic surfactant and particle size distribution for stabilised high-concentrated coal water slurry, *Int. J. of Coal Preparation and Utilization*, 2019.
25. **Behera U., Das S. K., Mishra D. P., Parhi P. K., and Das D.** Sustainable transportation, leaching, stabilisation, and disposal of fly ash using a mixture of natural surfactant and sodium silicate, *ACS omega*, 2021, Vol. 6, No. 35. — P. 22820–22830.
26. **Routray A., Senapati P. K., Padhy M., Das D., and Mohapatra R. K.** Effect of mixture of a non-ionic and a cationic surfactant for preparation of stabilised high concentration coal water slurry, *Int. J. of Coal Preparation and Utilization*, 2022, Vol. 42, No. 3. — P. 925–940.
27. **Das D., Das S. K., Parhi P. K., Dan A. K., Mishra S., and Misra P. K.** Green strategies in formulating, stabilising and pipeline transportation of coal water slurry in the framework of WATER-ENERGY NEXUS: A state of the art review, *Energy Nexus*, 2021, Vol. 4. — P. 100025.
28. **Wang S., Liu J., Pisupati S. V., Li D., Wang Z., and Cheng J.** Dispersion mechanism of coal water slurry prepared by mixing various high-concentration organic waste liquids, *Fuel*, 2021, Vol. 287. — P. 119340.
29. **Tang M. and Wen S.** Adsorption characteristics of starch digested with alkali on fine hematite particles, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55. — P. 469–476.
30. **Burdukov A. P., Konovalov V. V., Popov V. I. et al.** Rheological properties and characteristics of hydraulic transportation and heat-mass exchange of coal-water fuels, *J. Min. Sci.*, 2002, Vol. 38. — P. 220–228.
31. **Snyder L. R.** Interactions responsible for the selective adsorption of nonionic organic compounds on alumina, Comparisons with adsorption on silica, *J. Phys. Chemistry*, 1968, Vol. 72, No. 2. — P. 489–494.
32. **Somasundaran P., Fu E., and Xu Q.** Coadsorption of anionic and nonionic surfactant mixtures at the alumina-water interface, *Langmuir*, 1992, Vol. 8, No. 4. — P. 1065–1069.
33. **Das D., Panigrahi S., Misra P. K., and Nayak A.** Effect of organised assemblies. Part 4. Formulation of highly concentrated coal-water slurry using a natural surfactant, *Energy and Fuels*, 2008, Vol. 22, No. 3. — P. 1865–1872.

34. **Das D., Mohapatra R. K., Belbsir H., Routray A., Parhi P. K., and El-Hami K.** Combined effect of natural dispersant and a stabiliser in formulation of high concentration coal water slurry: Experimental and rheological modeling, *J. Molecular Liquids*, 2020, Vol. 320. — P. 114441.
35. **Huang J., Xu J., Wang D., Li L., and Guo X.** Effects of amphiphilic copolymer dispersants on rheology and stability of coal water slurry, *Industrial and Eng. Chemistry Research*, 2013, Vol. 52, No. 25. — P. 8427–8435.
36. **Das D., Dash U., Meher J., and Misra P. K.** Improving stability of concentrated coal–water slurry using mixture of a natural and synthetic surfactants, *Fuel Proc. Technol.*, 2013, Vol. 113. — P. 41–51.
37. **Das D., Pattanaik S., Parhi P. K., Mohapatra R. K., Jyothi R. K., Lee J. Y., and Kim H. I.** Stabilisation and rheological behavior of fly ash–water slurry using a natural dispersant in pipeline transportation, *ACS omega*, 2019, Vol. 4, No. 25. — P. 21604–21611.
38. **Senapati P. K., Pothal J. K., Barik R., Kumar R., and Bhatnagar S. K.** Effect of particle size, blend ratio and some selective bio – additives on rheological behaviour of high – concentration iron ore slurry, *In Paste 2018, Proc. of the 21<sup>st</sup> Int. Seminar on Paste and Thickened Tailings*, 2018. — P. 227–238. Australian Centre for Geomechanics.
39. **Silva R., Garcia F. A., Faia P. M., and Rasteiro M. G.** Settling suspensions flow modelling: a review, *KONA Powder and Particle J.*, 2015. — P. 2015009.
40. **Addie G. R.** Slurry pipeline design for operation with centrifugal pumps, *In Proc. of the 13<sup>th</sup> Int. Pump Users Symposium*. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, 1996.
41. **Shrimali K., Jin J., Hassas B. V., Wang X., and Miller J. D.** The surface state of hematite and its wetting characteristics, *J. Colloid and Interface Sci.*, 2016, Vol. 477. — P. 16–24.
42. **Qiu G., Jiang T., Fa K., Zhu D., and Wang D.** Interfacial characterisations of iron ore concentrates affected by binders, *Powder Technol.*, 2004, Vol. 139, No. 1. — P. 1–6.
43. **Mohammed I., Al Shehri D., Mahmoud M., Kamal M. S., and Alade O. S.** Impact of iron minerals in promoting wettability alterations in reservoir formations, *ACS omega*, 2021, Vol. 6, No. 5. — P. 4022–4033.
44. **Hurwitz G., Guillen G. R., and Hoek E. M.** Probing polyamide membrane surface charge, zeta potential, wettability, and hydrophilicity with contact angle measurements, *J. Membrane Sci.*, 2010, Vol. 349, No. 1–2. — P. 349–357.
45. **Bassioni G. and Taha Taqvi S.** Wettability studies using zeta potential measurements, *J. Chemistry*, 2015.
46. **Taqvi S. and Bassioni G.** Understanding wettability through zeta potential measurements, *Wettability and Interfacial Phenomena-Implications for Material Proc.*, 2019.
47. **Kelessidis V. C., Dalamarinis P., and Maglione R.** Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel–Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows, *J. Petroleum Sci. and Eng.*, 2011, Vol. 77, No. 3–4. — P. 305–312.
48. **Hashemi S. A., Wilson K. C., and Sanders R. S.** Specific energy consumption and optimum operating condition for coarse-particle slurries, *Powder Technol.*, 2014, Vol. 262. — P. 183–187.

*Поступила в редакцию 02/XI 2022  
После доработки 10/III 2023  
Принята к публикации 16/III 2023*