

УДК 656.56

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОДНОРОДНЫХ И БИМОДАЛЬНЫХ ЖИДКОСТНЫХ ПУЛЬП ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

С. Кумар, С. Кумар, М. Сингх, Дж. П. Сингх, Дж. Сингх

*Инженерно-технологический институт им. Тхапара,
E-mail: skumar_me16@thapar.edu, 147004, г. Патнала, Индия*

Проведен обзор литературы, посвященной изучению реологического поведения пульп, состоящих из частиц рыхлых и твердых материалов. Представлены реологические характеристики однородных и бимодальных пульп. Обнаружено, что вязкость пульпы повышается с увеличением концентрации твердого компонента и понижается с ростом температуры. Добавление более мелких частиц в размере 30 % по массе к пульпе более крупных приводит к значительному снижению эффективной вязкости. Выполнен прогноз эффективной вязкости пульпы с помощью моделирования с использованием искусственной нейронной сети ANN.

Железная руда, реология, однородный, бимодальный, эффективная вязкость

DOI: 10.15372/FTPRPI20190204

В настоящее время трубопроводный транспорт сыпучих твердых материалов, отличающийся низкими эксплуатационными расходами, минимальным загрязнением окружающей среды, круглогодичной доступностью и исключительной безопасностью, применяется во многих отраслях промышленности [1, 2]. Такие сыпучие материалы, как полезные ископаемые, угольная зола и др., транспортируют на малые и большие расстояния в смеси с жидкостью-носителем [3, 4].

При транспортировке твердожидкостной суспензии на свойства потока влияет размер частиц, их форма, вязкость пульпы, концентрация твердой фазы. С целью повышения эффективности данной системы транспорта суспензий твердых частиц в жидкости необходимо исследовать реологические свойства твердой фазы [5]. Характеристики осаждения и реологическое поведение пульп различных минералов изучены в [6]. Установлено, что модель Гершеля–Балкли пригодна для описания процесса при низкой скорости сдвига, модель Cisco — при высокой 10^4 с^{-1} . Обнаружено, что минеральные пульпы демонстрируют поведение псевдопластичного потока вплоть до скорости сдвига, равной 13000 с^{-1} [7]. При этом плавное турбулентное течение зависит от реологических характеристик пульп. Зависимость реологического поведения жидкостных суспензий угля от размера угольных частиц описана в [8]. Показано, что транспорт топлива в виде водоугольной суспензии повышенной концентрации и низкой вязкости удобно осуществлять после смешивания крупных угольных частиц с тонкодисперсной пульпой. В исслед-

довании влияния магнитного поля на жидкую суспензию руды выявлено, что поведение потока можно описывать с помощью модели Гершеля–Балкли с показателем текучести $n = 0.38 - 0.90$ при усилении магнитного поля свыше $41 \cdot 10^{-4}$ Т [9]. Понижение вязкости известковой пульпы с ростом температуры описано в [10], где изменение вязкости объясняется с помощью уравнения Аррениуса. В исследованиях реологического поведения водоугольной суспензии установлено, что модель Гершеля–Балкли хорошо согласуется с экспериментальными данными, а водоугольная суспензия демонстрирует свойства псевдопластичного потока при концентрации твердого компонента 60–70 % [11]. Повышение вязкости магнетитовых суспензий с ростом концентрации твердого компонента и увеличением размера частиц описано в [12]. Сравнение результатов экспериментов с данными шести моделей методом искусственных нейронных сетей найден лучший вариант — модель Лиу.

Влияние различных присадок на реологические характеристики суспензии железной руды изучено в [13]. Концентрации присадок (полиакриловые кислоты DPW 410, 510 и 610, лимонная кислота, гексаметафосфат натрия) варьировали от 300 г/т. Добавка присадки объемом 300 г/т значительно снижает вязкость суспензии железной руды. Анализ реологических характеристик железной руды, определенных переизмельчением, выявил влияние диспергирующих присадок на качество железорудных окатышей [14]. Также обсуждалось влияние переизмельчения на реологические свойства железной руды сверхтонкого помола. Эффект микроволновой обработки железной руды на реологические свойства водной суспензии железной руды исследован в [15]. Обработанные и необработанные образцы демонстрировали поведение псевдопластичного потока. Плотность и вязкость образцов железной руды, обработанных микроволнами, были выше этих же показателей необработанных образцов. Эксперименты по изучению влияния размера частиц и гранулометрического состава смеси на предел текучести и вязкости смеси жидкости и биоугля показали, что с увеличением среднего диаметра частиц свыше D_{50} (< 15 мкм) предел текучести суспензии повышается [16]. Вязкость бимодального потока пульпы выше, чем вязкость однородной пульпы. В [17] получено эмпирическое соотношение для вязкости зольных суспензий, выраженное через объемное содержание, средний диаметр частиц угля и коэффициент однородности с помощью метода наименьших квадратов. Наилучшим вариантом для описания потока пульпы повышенной концентрации оказалась модель Бингама.

Обзор литературы показал, что происхождение минерала значительно влияет на реологические свойства суспензии данного минерала. Существует множество сведений о реологических свойствах твердых материалов низкой прочности (уголь, летучая зола, зольный остаток, песок и т. д.) [5–11]. Реологию прочных твердых материалов (например, металлические хвосты обогащения) исследовали с акцентом на однородные суспензии мелких классов [12, 15].

Цель настоящей работы — исследование реологических характеристик жидкостной пульпы железной руды однородного и бимодального фракционного состава. Для экспериментов с однородным составом подготавливали пульпу с размером частиц 53–75 мкм при концентрации твердой фазы 30–60 %. Для бимодальной пульпы в пульпу однородного фракционного состава вносили более мелкие частицы < 53 мкм с концентрацией твердого компонента 60 %.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Проведены эксперименты на образцах гематитовой руды, полученных на руднике Наомунди Айрон (штат Джаркханд, Индия). Образцы разрушали в молотовой дробилке и измельчали в лабораторной шаровой мельнице. Измельченный образец выдерживали в электропечи при температуре 120 °С в течение 1 ч для удаления влаги. Навески высушенных образцов извест-

ной массы пропускали через стандартное сито британской гранулометрической шкалы с целью получения требуемого фракционного состава. Выполняли замер и расчет процентного содержания ситового остатка. Значения рН жидкостной пульпы железной руды с концентрацией твердой фазы 30–60 % по массе определяли с помощью цифрового рН-метра, откалиброванного на буферных растворах с рН 3–7. Образование железорудного осадка происходило в динамических и статических условиях. Максимальную концентрацию железорудного осадка в статических условиях рассчитывали с помощью гравитационного метода. При транспорте жидкостной пульпы железной руды, когда концентрация твердого компонента приближалась к максимальной концентрации осадка в статических условиях, расход удельной энергии увеличивался. Изучение химических, поверхностных и морфологических свойств образцов железной руды проводили методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионного анализа (ЭДА). В случае применения метода СЭМ образец заземляли для предотвращения ошибок сканирования вследствие присутствия статического заряда на поверхности образца. Для усиления сигнала и поверхностного разрешения образцы покрывали ультратонким золотом. Микроснимки образцов с увеличением 1000× получали с помощью микроскопа SEM-JSM-6510LV JEOL.

Дополнительно изучали характеристики текучести жидкостной суспензии железной руды при концентрации твердого компонента 30–60 % по массе. Реологические свойства экспериментально исследовали на оборудовании Anton Par Rheolab QC Rheometer. Требуемую концентрацию образца получали смешиванием воды и навески железной руды определенной массы. Подготовленный образец пульпы перемешивали стеклянным стержнем в течение 10 мин для достижения надлежащего смешивания воды и руды. Исходная руда для приготовления суспензии с концентрацией твердого компонента 30–60 % по массе имела размер частиц 53–75 мкм. Влияние температуры на реологическое поведение жидкостно-рудной пульпы исследовали при температуре 30–60 °С. Для поддержания необходимой температуры применяли электрический водонагреватель с погрешностью измерений ± 0.5 °С, соединенный с реометром. Также изучали влияние добавки более мелких частиц на реологию пульпы, состоящей из крупных частиц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Размерная вариативность частиц в образцах железной руды достигалась с помощью механизированного настольного вибратора для сит производства компании Superb Technologies (г. Амбала, Индия). Образец просеивали 30 мин через несколько сит с расчетом процентного содержания остатка для каждого сита. На рис. 1 показано распределение частиц образца по крупности. Установлено, что все частицы имели размер < 250 мкм, включая 97.6 % частиц < 106 мкм, 92.6 % частиц < 75 мкм и 54.6 % частиц < 53 мкм. Морфологический и химический состав образцов определяли методами СЭМ и ЭДА.

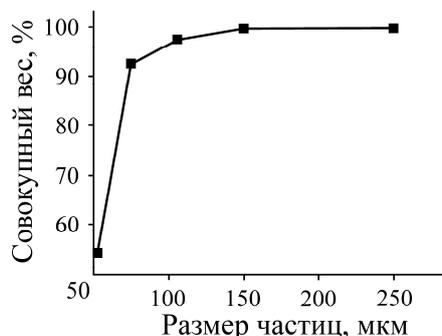


Рис. 1. Гранулометрический состав образца железной руды

На рис. 2а показан микроснимок СЭМ при 1000-кратном увеличении. Видно, что частицы железной руды имеют форму кристаллов и волокон, структура образца зернистая. Пятна белой окалины возникли после рудничного пожара. В результате ЭДА получен химический состав гематитовой руды (рис. 2б). В составе образца присутствует 67% железа, остальные компоненты в меньших количествах. Максимальную концентрацию статически полученного осадка однородной пульпы, твердая фаза которой представлена частицами 53–75 мкм, наблюдали с применением гравитационного метода. Пульпу с концентрацией твердой фазы 30–60% по массе осаждали в мерном цилиндре в течение 24 ч. По истечении этого времени осаждение частиц не происходило.

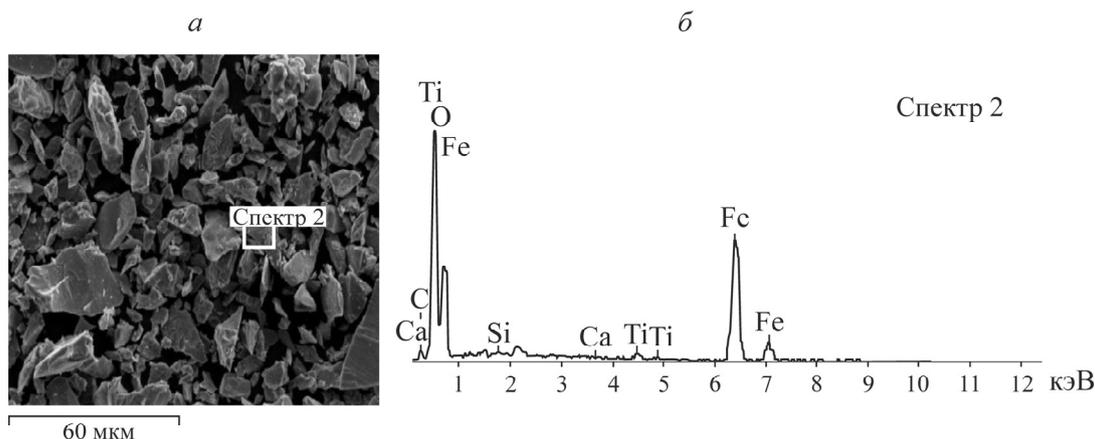


Рис. 2. Микроснимок СЭМ (а) и результаты ЭДА образца железной руды (б)

Максимальная концентрация статического осадка вычисляется по формуле

$$C_{w\max} = \frac{W_s}{W_s + W_w},$$

где W_s , W_w — масса твердого компонента и жидкости в осадке.

Максимальные концентрации статических полученных осадков рассчитывали для пульпы с концентрацией твердой фазы 30–60% по массе (табл. 1). Установлено, что $C_{w\max}$ зависит от исходной концентрации твердой фазы в пульпе. Максимальные значения концентрации осадка 78.03, 83.46, 86.90 и 88.54% найдены при исходных концентрациях твердой фазы в пульпе 30, 40, 50 и 60% соответственно. Согласно измеренным значениям рН, пульпа является щелочной с диапазоном рН 9.23–8.97 при концентрации твердого компонента в пульпе 30–60% (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Максимальная статическая концентрация твердой фазы и рН при разной концентрации твердого компонента в исходной пульпе

Концентрация твердого компонента по массе, %	Максимальная статическая концентрация $C_{w\max}$, %	рН
30	78.03	9.23
40	83.46	8.97
50	86.90	9.02
60	88.54	9.08

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОРОДНОЙ ПУЛЬПЫ

Экспериментально исследовали реологические характеристики однородной пульпы с размером частиц железной руды 53–75 мкм в диапазоне их концентрации в пульпе 30–60 % по массе. Измерения эффективной вязкости проводили при сдвиговой скорости 0–600 с⁻¹. Изменение сдвигового напряжения в зависимости от скорости сдвига приведено на рис. 3а. Реологические эксперименты подтверждают сильную зависимость текучести пульпы от концентрации твердой фазы. Согласно реограммам, пульпа проявляет свойства ньютоновской жидкости при концентрации твердого компонента 30 %. С увеличением концентрации твердой фазы выше 30 % пульпа переходит от ньютоновского к псевдопластичному течению. Результаты экспериментов показывают, что псевдопластичное течение возникает при концентрации твердого компонента в пульпе 40–60 %.

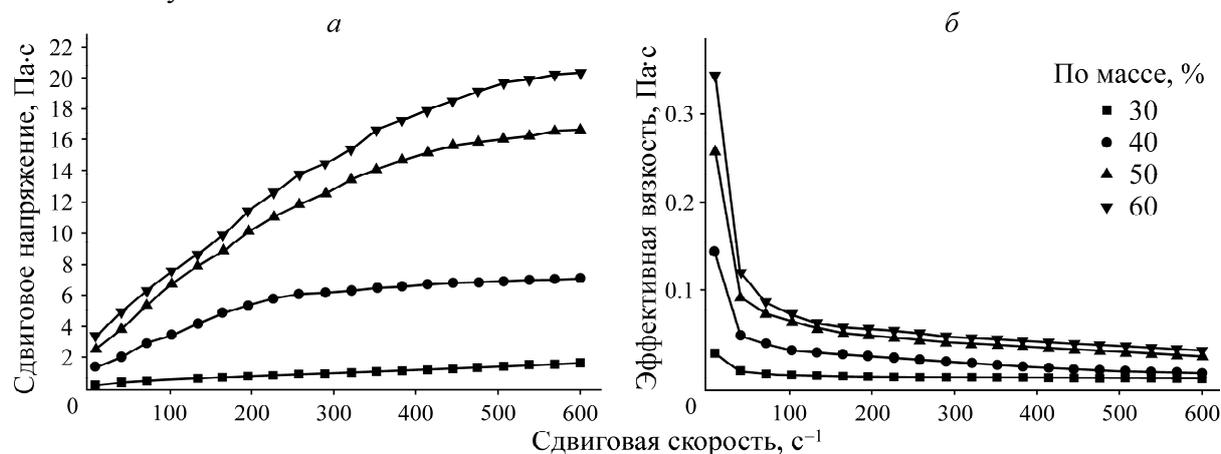


Рис. 3. Реограмма водно-железорудной пульпы (а) и зависимость эффективной вязкости от сдвиговой скорости пульпы (б)

Зависимости эффективной вязкости от сдвиговой скорости при концентрации твердой фазы в пульпе 30–60 % приведены на рис. 3б. Видно, что эффективная вязкость пульпы возрастает с увеличением концентрации твердого компонента. С увеличением концентрации твердых частиц в пульпе расстояние между частицами уменьшается, что ведет к уменьшению количества воды между частицами и снижению их мобильности. Повышение эффективной вязкости происходит в результате усиления сдвигового взаимодействия между частицами, что приводит к росту сопротивления потоку в пульпе [2, 16]. Замечено, что увеличение сдвиговой скорости снижает эффективную вязкость. При концентрации твердой фазы в пульпе 30 % эффективная вязкость имеет понижающий тренд вплоть до сдвиговой скорости 165 с⁻¹, после чего незначительно меняется. Быстрое уменьшение эффективной вязкости отмечалось при сдвиговой скорости 258 с⁻¹ для пульпы с концентрацией твердого компонента 40 % и 352 с⁻¹ — для 50 и 60 %. При дальнейшем повышении скорости сдвига эффективная вязкость менялась незначительно.

СООТВЕТСТВИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Реологические модели описывают поведение жидкостей путем определения номинальных функций для связи скорости деформирования и напряжения сдвига. Поведение пульпы можно представить с помощью степенной зависимости, модели Гершеля – Балкли и Кассона:

$$\tau = k\gamma^n, \quad \tau = \tau_{y,h} + k\gamma^n, \quad \tau = \tau_{y,c}^{1/2} + (\eta_s\gamma)^{1/2},$$

где k, n — показатель текучести и консистенции; τ_y — напряжение пластического течения (предел текучести).

Из формы полученных кривых (рис. 3) следует, что с увеличением скорости сдвига пульпа демонстрирует сдвиговое течение, сопровождающееся уменьшением вязкости. Псевдопластичное течение жидкостной пульпы гематита можно описать с помощью модели Гершеля – Балкли. На рис. 4 представлены данные регрессионного анализа по совмещению определенной модели и экспериментальных данных. Для модели Гершеля – Балкли найден коэффициент корреляции в диапазоне $0.95 < R^2 < 0.99$.

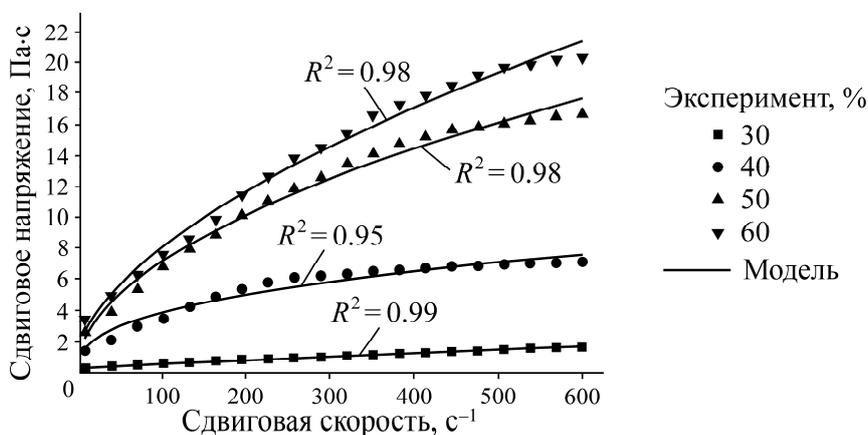


Рис. 4. Соответствие реологической модели и экспериментальных данных при разных концентрациях твердой фазы в пульпе

Модельные параметры реологических кривых сведены в табл. 2. Эксперименты на жидкостной пульпе магнетита [9] подтвердили применимость модели Гершеля – Балкли для описания реологических характеристик.

ТАБЛИЦА 2. Параметры реологических кривых, найденные экспериментально

Концентрация твердого компонента по массе, %	k , кг/мс	n	Тип течения
30	0.0024	0.990	Ньютоново
40	0.6560	0.370	Псевдопластичное
50	0.7000	0.504	Псевдопластичное
60	0.4900	0.580	Псевдопластичное

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТНОЙ ПУЛЬПЫ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Экспериментально исследовано влияние температуры на вязкость пульпы. На рис. 5 показано изменение эффективной вязкости от сдвиговой скорости при температуре 30–60 °С с концентрацией твердой фазы в пульпе 60 %. Видно, что с повышением температуры эффективная вязкость пульпы снижается. Зависимость эффективной вязкости от температуры можно объяснить с позиций молекулярной мобильности. При низких температурах мобильность молекул уменьшается, так как молекулы удерживаются на более близких расстояниях друг к другу, что ведет к повышению вязкости пульпы. С ростом температуры кинетическая энергия молекул повышается, в результате чего межмолекулярные силы уменьшаются и вязкость пульпы увеличивается. Максимальное снижение эффективной вязкости отмечено при 50 °С. Понижающий тренд эффективной вязкости наблюдался и при 60 °С, но скорость такого снижения меньше.

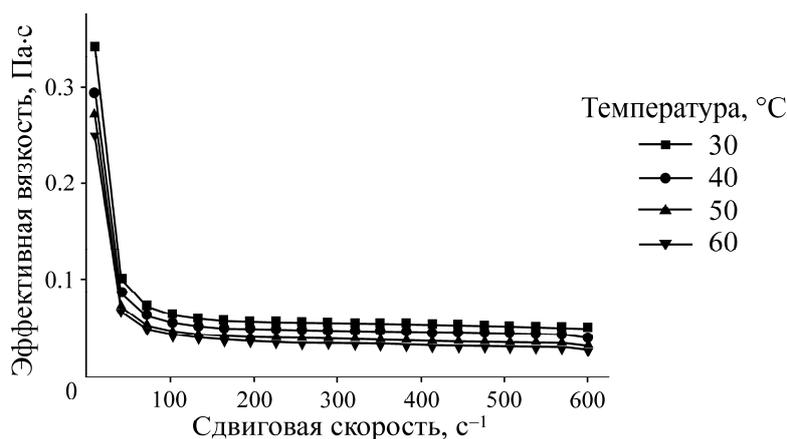


Рис. 5. Влияние температуры на эффективную вязкость пульпы при концентрации твердого компонента 60 % по массе

В [10] снижение вязкости минеральной пульпы известняка объясняли с помощью уравнения Аррениуса. Вязкость — степень сопротивления течению, которая повышается вследствие присутствия большого количества молекул в концентрированных пульпах. Для преодоления сопротивления течению в вязких пульпах требуется больше энергии. Энергию, необходимую для преодоления сопротивления течению, охарактеризовали как энергию активации потока E_a и рассчитывали из уравнения Аррениуса:

$$\eta = Ae^{\frac{E_a}{RT}}, \quad \ln \eta = \frac{E_a}{RT} + \ln A,$$

где η — вязкость потока при определенной скорости сдвига, Па·с; T — температура, К; R — универсальная газовая постоянная; A — параметр, определяемый экспериментально.

На рис. 6 показаны кривые зависимости логарифма вязкости от температуры, полученные для пульп с концентрацией твердой фазы 50 и 60 % при двух значениях сдвиговой скорости. Величина угла наклона кривой использовалась для расчета энергии активации.

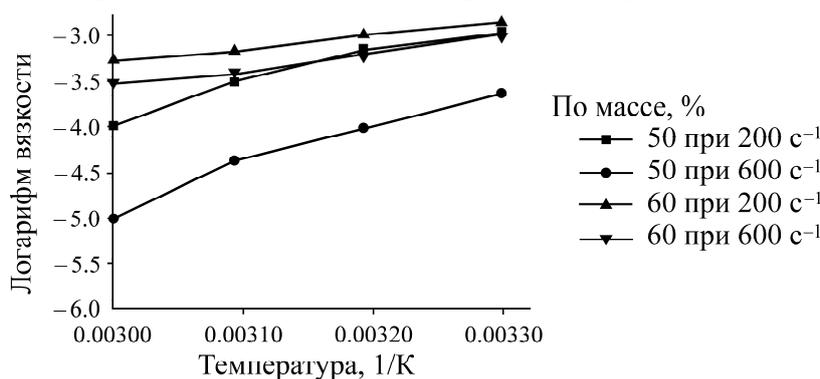


Рис. 6. Изменение логарифма вязкости под действием температуры в пульпе при концентрации твердых частиц размером 53–75 мкм 50 и 60 % и сдвиговой скорости 200 и 600 с⁻¹

В табл. 3 сведены значения энергии активации при разных сдвиговых скоростях и концентрациях твердого компонента в пульпе. Видно, что энергия активации слабо зависит от концентрации твердого компонента и скорости сдвига. Похожие результаты получены в исследованиях угольных пульп [2, 18].

ТАЛИЦА 3. Энергия активации потока пульпы при разной концентрации твердого компонента и сдвиговой скорости

Показатель	Концентрация твердого компонента по массе, %			
	50		60	
Сдвиговая скорость, с^{-1}	200	600	200	600
Энергия активации, $\text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$	28.42	37.41	12.03	15.60

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИМОДАЛЬНОЙ ПУЛЬПЫ

Цель исследования — определение возможности транспортирования жидкостных пульп железной руды с максимальной концентрацией твердой фазы при пониженной вязкости пульпы и минимальной стоимости транспорта. Проведены эксперименты, в которых в пульпу с крупными частицами вмешивали более мелкие фракции. В случае менее прочных материалов (уголь, угольная зола) поверхностная неоднородность пульпы уменьшается с увеличением размера частиц, что ведет к снижению эффективной вязкости пульпы. Для крепких материалов (железная руда) поверхностная неоднородность усиливается с увеличением размера частиц, в результате чего вязкость потока более крупных частиц выше, чем вязкость потока более мелких [19].

Бимодальная пульпа железной руды подготавливалась путем добавления мелких фракций размером < 53 мкм в пульпу частиц размером $53 - 75$ мкм. Для определения оптимального соотношения мелких и крупных частиц в пульпе с концентрацией твердого компонента 60 % и размером частиц $53 - 75$ мкм содержание мелких фракций в экспериментах варьировало от 10 до 40 %. На рис. 7 показана зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига при добавлении 10–40 % мелких фракций в пульпу с концентрацией твердой фазы 60 %.

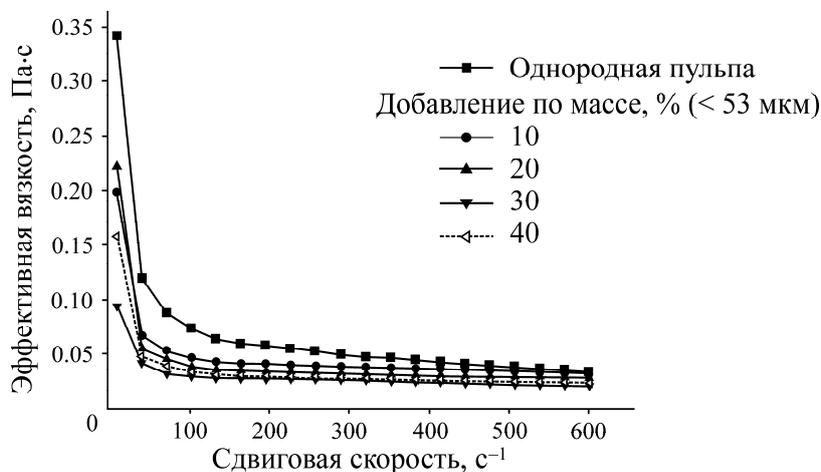


Рис. 7. Изменение эффективной вязкости в зависимости от сдвиговой скорости в пульпе с концентрацией твердых крупных частиц 60 % по массе при добавлении более мелких частиц

Видно, что течение однородной жидкостной пульпы железной руды имеет характеристики псевдопластичной жидкости. Эффективная вязкость пульпы уменьшается с ростом содержания мелких фракций от 10 до 30 %. Максимальное снижение вязкости отмечено при 30 % содержании более мелких частиц. Снижение эффективной вязкости объясняется тем, что добавление частиц < 53 мкм в пульпу с размером частиц $53 - 75$ мкм увеличивает их дисперсию, снижает поверхностное натяжение и силу взаимодействия частиц [2]. Относительное снижение эффек-

тивной вязкости при добавлении 10, 20 и 30 % мелких частиц в пульпу более крупных частиц при скорости сдвига 165 с^{-1} составило 30.50, 15.78 и 17.89 %, а относительное снижение кажущейся вязкости при скорости 600 с^{-1} — 2.65, 13.03 и 25.20 %. Дальнейшее повышение объема добавки более мелких частиц дает небольшой повышающий тренд эффективной вязкости (рис. 8). Подобное реологическое поведение бимодальной пульпы угля описано в [8, 19]. Понижающий тренд эффективной вязкости способствует снижению энергозатрат и уменьшению давления трубопроводного транспорта пульп.

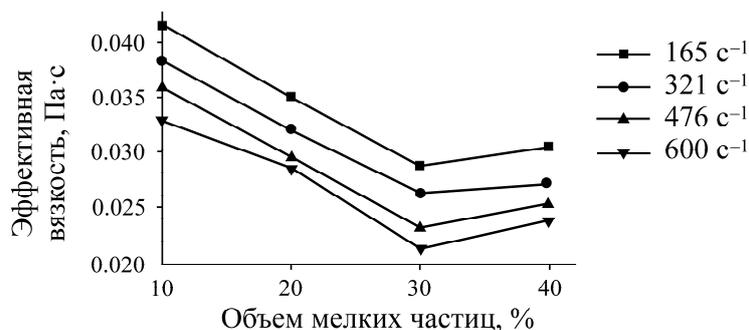


Рис. 8. Влияние объема добавки мелких частиц на эффективную вязкость пульпы крупных частиц при их концентрации 60 % по массе

ПРОГНОЗ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ANN

Нейронные сети являются системами прогнозирования, использующими при обработке данных процесс обучения [20]. В настоящей работе применяли стандартную мультипликативную нейронную сеть с системой прогнозирования событий в программе MATLAB 16.0. На рис. 9 показана нейронная сеть, состоящая из трех уровней (входной, выходной и скрытый). Входной уровень включает три входных нейрона: концентрация твердой фазы, плотность пульпы и сдвиговая скорость. Выходной уровень представляет собой прогнозные значения эффективной вязкости.

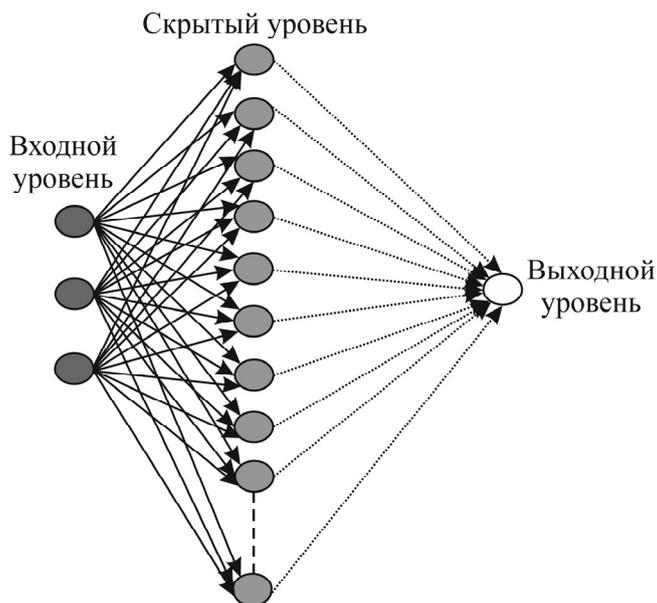


Рис. 9. Трехуровневая нейросетевая модель

Для обучения нейронных сетей использовали алгоритмы Байеса вследствие их быстрой сходимости [21]. Весовой фактор для каждого уровня вводили с помощью алгоритма Нгуена и Уидрой, а погрешности минимизировали путем правила обратной передачи ошибки обучения:

$$dW = \eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}},$$

где $\partial E / \partial W_{ij}$ — градиент погрешности относительно весового фактора W_{ij} ; η — параметр скорости обучения.

Показатель W_{ij} является уточнением весового фактора связи i и j нейронов двух соседних уровней. Параметры обучения, входящие в прогнозную реологическую модель, приведены на рис. 10. Функции обучения и проверки нормализовали в диапазоне 0.1–0.9 с помощью уравнения $y = 0.1 + 0.8[(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})]$.

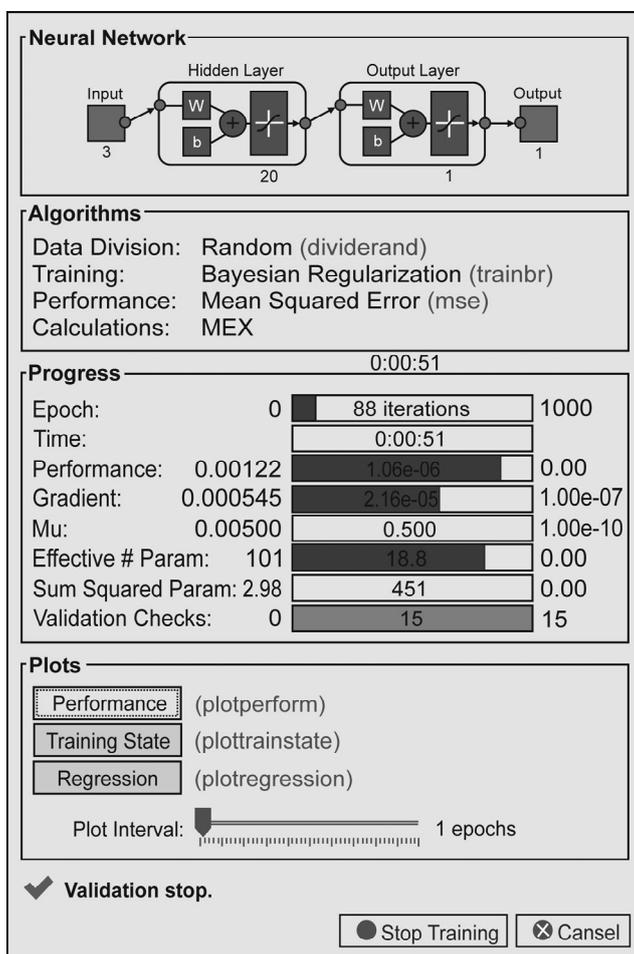


Рис. 10. Обучающие параметры для прогноза эффективной вязкости водно-железородной пульпы

Методом расчета среднеквадратичной погрешности определяли соответствие экспериментальных и прогнозных данных. На рис. 11 показана производительность работы нейронной сети в процессе обучения, тестирования и проверки правильности. Для анализа брали 20 нейронов, для обучения использовали 75 % данных, для тестирования — 12.5, для валидации — 12.5.

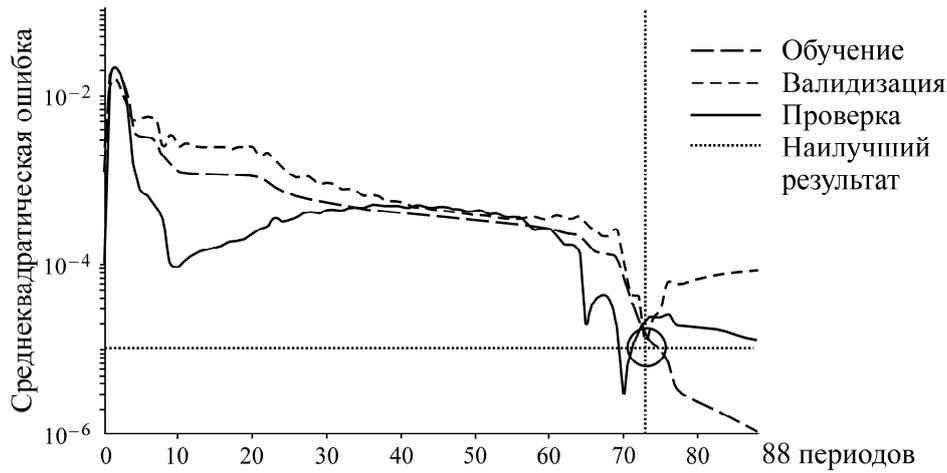


Рис. 11. Эффективность обучения нейронной сети

Из рис. 11 следует, что нейронная сеть была обучена на 88 периодах с нулевой ошибкой. После этого провели этап проверки сети для построения графиков значений регрессии для обучения, валидизации, тестирования нейронной сети и общей производительности. Взаимосвязь между целями и выходными данных нейросети представлена на рис. 12. Пунктирные линии — цели (отличие между идеальным результатом и выходными данными), сплошные — различие между выходными данными и целями. Коэффициенты регрессии R^2 для процессов обучения, тестирования, подтверждения правильности и общей эффективности модели составили 0.99868, 0.97941, 0.99955 и 0.99778. Они близки к единице, что означает линейность соотношения выходных и целевых данных.

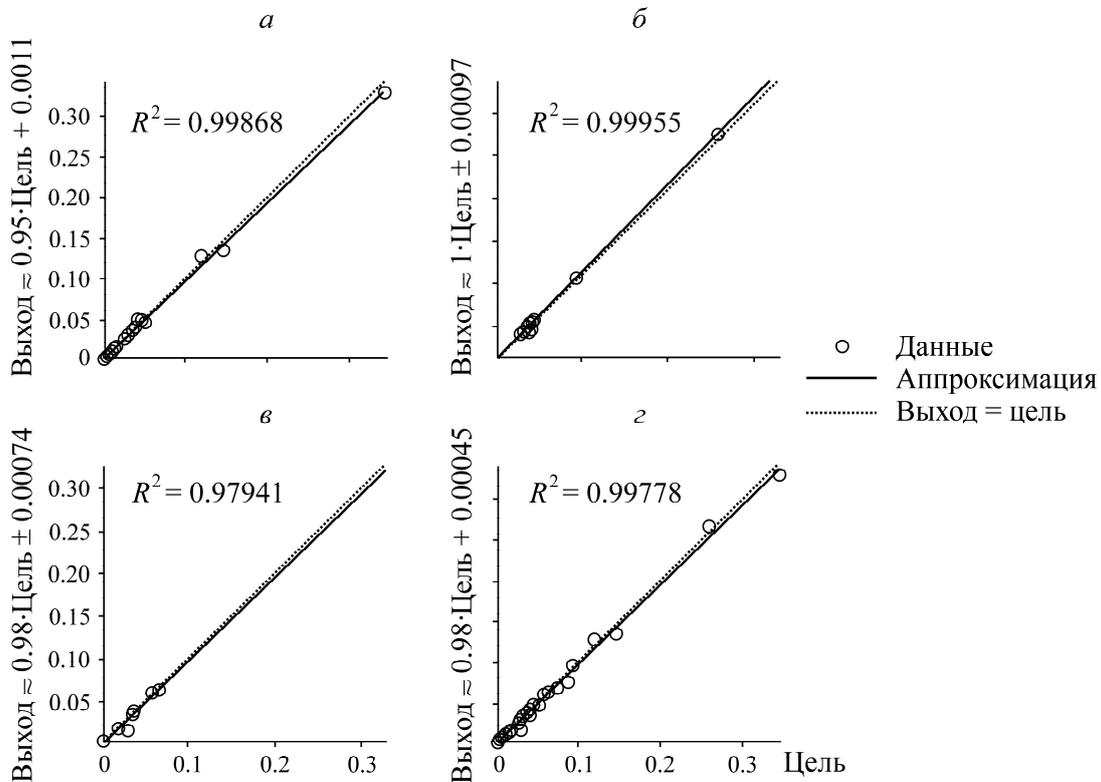


Рис. 12. Кривые регрессии процессов обучения (а), валидизации (б), тестирования нейронной сети (в) и общей производительности (г)

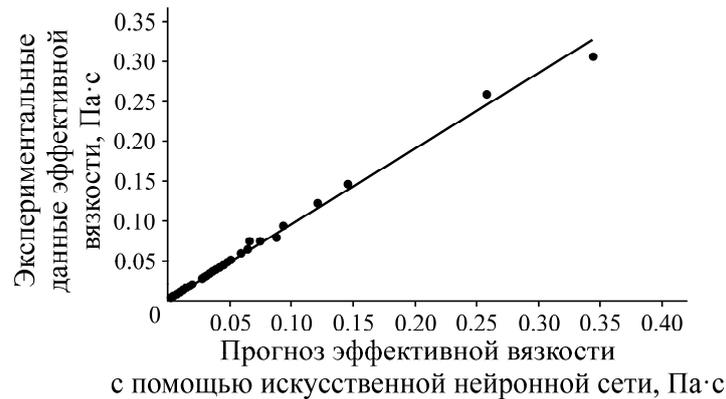


Рис. 13. Согласованность экспериментальной и прогнозной эффективной вязкости

Значения вязкости, полученные экспериментально и спрогнозированные с помощью ANN, приведены на рис. 13. Расхождение между экспериментальными и прогнозными данными составило $\pm 5\%$, т. е. данные моделирования нейронными сетями и результаты экспериментов показывают хорошую сходимость.

ВЫВОДЫ

Жидкостная пульпа железной руды демонстрирует характеристики ньютоновского течения при концентрации твердой фазы 30 % и псевдопластичной жидкости при повышении концентрации твердого компонента. Реологическая модель Гершеля – Балкли лучше всех соотносится с полученными экспериментально реологическими характеристиками. Энергия активации пульпы не зависит от концентрации твердой фазы и сдвиговой скорости. Добавка более мелких фракций в пульпу крупных частиц улучшает реологические характеристики пульпы. Оптимальный объем добавки 30 % по массе.

Расхождение между результатами экспериментов и прогнозной вязкостью составляет $\pm 5\%$, что указывает на хорошую сходимость модельных и экспериментальных данных. Коэффициенты регрессии для процессов обучения, тестирования, подтверждения правильности и общей эффективности модели равны 0.99868, 0.97941, 0.99955 и 0.99778, что означает наилучшее соответствие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tangsathitkulchai C.** The effect of slurry rheology on fine grinding in a laboratory ball mill, *Int. J. Miner. Process.*, 2003, Vol. 69, No. 1. — P. 29–47.
2. **Singh M. K., Ratha D., Kumar S., and Kumar D.** Influence of particle-size distribution and temperature on rheological behavior of coal slurry, *Int. J. Coal Prep. Util.*, 2016, Vol. 36, No. 1. — P. 44–54.
3. **Yuchi W., Li B., Li W., and Chen H.** Effects of coal characteristics on the properties of coal water slurry, *Coal Prep.*, 2005, Vol. 25, No. 4. — P. 239–249.
4. **Bobicki E. R., Liu Q., and Xu Z.** Effect of microwave pre-treatment on ultramafic nickel ore slurry rheology, *Mineral. Eng.*, 2014, Vol. 61. — P. 97–104.
5. **Singh J. P., Kumar S., and Mohapatra S. K.** Modelling of two phase solid-liquid flow in horizontal pipe using computational fluid dynamics technique, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017, Vol. 42, No. 31. — P. 20133–20137.
6. **Turian R. M., Ma T. W., Hsu F. L. G., and Sung D. J.** Characterization, settling, and rheology of concentrated fine particulate mineral slurries, *Powder Technol.*, 1977, Vol. 93, No. 3. — P. 219–233.

7. **Slatter P.** The role of rheology in the pipelining of mineral slurries, *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, 2000, Vol. 20, No. 1. — P. 281–300.
8. **Lorenzi L. D. and Bevilacqua P.** The influence of particle size distribution and nonionic surfactant on the rheology of coal water fuels produced using Iranian and Venezuelan coals, *Coal Prep.*, 2002, Vol. 22, No. 5. — P. 249–268.
9. **Yang X. and Aldrich C.** Rheology of aqueous magnetite suspensions in uniform magnetic fields, *Int. J. Miner. Process.*, 2005, Vol. 77, No. 2. — P. 95–103.
10. **Senapati P. K., Panda D., and Parida A.** Predicting viscosity of limestone-water slurry, *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, 2009, Vol. 8, No. 3. — P. 203–221.
11. **Zhou M., Pan B., Yang D., Lou H., and Qiu X.** Rheological behavior investigation of concentrated coal-water suspension, *J. Dispersion Sci. Technol.*, 2010, Vol. 31, No. 6. — P. 838–843.
12. **Deosarkar M. P. and Sathe V. S.** Predicting effective viscosity of magnetite ore slurries by using artificial neural network, *Powder Technol.*, 2012, Vol. 219. — P. 264–270.
13. **Vieira M. G. and Peres A. E.** Effect of reagents on the rheological behavior of an iron ore concentrate slurry, *Int. J. Min. Eng. Miner. Process.*, 2012, Vol. 1, No. 2. — P. 38–42.
14. **Vieira M. G. and Peres A. E.** 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.
15. **Sahoo B. K., De S., and Meikap B. C.** An investigation into the influence of microwave energy on iron ore-water slurry rheology, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2015, Vol. 25. — P. 122–130.
16. **Liu P., Zhu M., Zhang Z., Leong Y.-K., Zhang Y., and Zhang D.** Rheological behaviour and stability characteristics of biochar-water slurry fuels: effect of biochar particle size and size distribution, *Fuel. Process. Technol.*, 2017, Vol. 156. — P. 27–32.
17. **Assefa K. M. and Kaushal D. R.** Experimental study on the rheological behaviour of coal ash slurries, *J. Hydrol. Hydromech.*, 2015, Vol. 63, No. 4. — P. 303–310.
18. **Mishra S. K., Senapati P. K., and Panda D.** Rheological behavior of coal-water slurry, *Energy Sources*, 2002, Vol. 24, No. 2. — P. 159–167.
19. **Ghanta K. C. and Purohit N. K.** Effect of Particle Size Distribution (PSD) on the Viscosity of Suspension of bi-dispersed Particles, *Proc. Hydrotransport*, 2002, Vol. 15. — P. 299–313.
20. **Mihalakakou G., Santamouris M., and Asimakopoulos D. N.** The total solar radiation time series simulation in Athens, using neural networks, *Theor. Appl. Climatol.*, 2000, Vol. 66. — P. 185–197.
21. **Hagan M. T. and Menhaj M.** Training feedforward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE Transactions of Neural Network*, 1994, Vol. 5, No. 6. — P. 989–993.

*Поступила в редакцию 09/V 2018
После доработки 09/V 2018
Принята к публикации 26/III 2019*