

УДК 519.87

Л.Д. Певзнер, В.Г. Костиков, О.А. Леттиев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ РУДЫ

Получено математическое описание стадий обработки руды от поступления исходного материала на участок дробления до получения готового продукта с участка гидроциклонной классификации, позволяющее установить массовое содержание руды мелкой и крупной фракций после обработки ее в соответствующих агрегатах дробления и измельчения, спрогнозировать качество классификации пульпы по крупности и использовать полученные результаты при разработке автоматизированной системы управления комплексом рудоподготовки горно-обогатительного комбината.

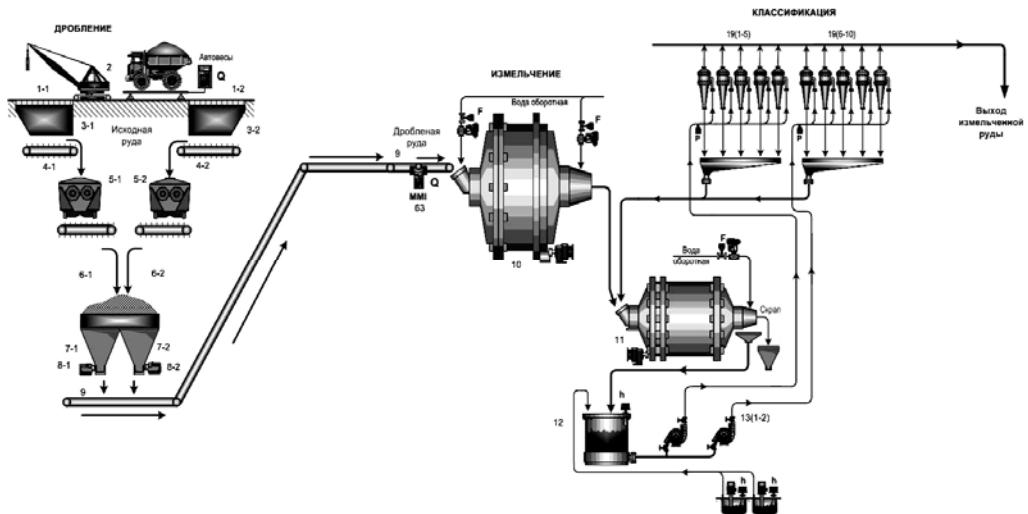
Ключевые слова: дробление, измельчение, гидроциклон, классификация пульп.

Семинар № 14

Одними из наиболее энергоемких и трудоемких процессов в технологии производства дисперсных материалов являются операции сокращения крупности кускового материала. Техника и технология на протяжении всего своего существования остается объектом пристального изучения видных специалистов, как в нашей стране, так и за рубежом. От качества

измельчения напрямую зависит производительность всех последующих стадий обработки материала [1].

Перед работой стоит цель получить адекватное математическое описание процесса рудоподготовки и создать модель, близкую по основным показателям к реальному процессу, чтобы на ее основе синтезировать соответствующую систему управления.



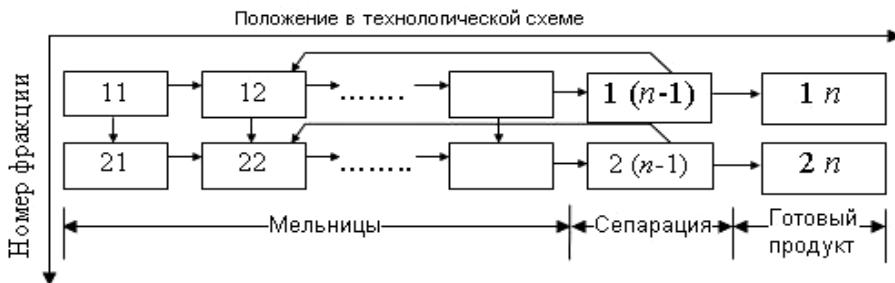


Рис. 2. Ячеичная модель измельчения и классификации

Рис. 1. Технологическая схема участка рудоподготовки

Процесс дробления и измельчения исходной руды организован следующим образом.

Исходная руда с карьера или со склада подается в шнекозубчатую дробилку поз. 5 (1–2). Дробленая руда по наклонному конвейеру (пластинчатому питателю) поз. 6 (1–2) транспортируется в бункера дозировки дробленой руды в мельницу поз. 7 (1–4) и образует над ними конус дробленой руды массой 2000–2500 кг. Дробленая руда из двух бункеров (поз. 7) с помощью вибропитателей поз. 8 (1–2) подается на ленточный конвейер поз. 9 и дозируется в мельницу.

Измельчение осуществляется в две стадии в мельницах ММПС поз. 10 (первая стадия) и шаровой мельнице с центральной разгрузкой МШЦ поз. 11 (вторая стадия).

Мельница первой стадии работает в открытом цикле, мельница второй стадии – в замкнутом с гидроциклонами ГЦР-500 поз. 19 (1–10).

Продукт измельчения мельницы второй стадии попадает в зумпф поз. 12 и 2 песковыми насосами ГРАТ 700/40 поз. 13 (1,2) направляется на классификацию в гидроциклонах поз. 19 (1–10).

Статистические данные показывают, что процессы дробления, измельчения и классификации носят исключительно случайный характер и в любой момент времени характеризуются переходными вероятностями. В соответствии с этим за основу математического моделирования процесса была принята теория Марковских цепей [2].

Построена ячеичная математическая модель процесса при представлении материала бинарной смесью крупной и мелкой фракций, границей между которыми является некоторый размер частиц, для данного процесса это 0,074 мм, по которому ведется контроль тонкости помола.

Процесс разбит по длине на n секций, из которых мельницам принадлежат $(n-2)$ секции, $(n-1)$ -я секция относится к локализованной модели мельничного классификатора, а n -я секция – к бункеру готового материала. В каждой секции материал может принадлежать к крупной (1) и мелкой (2) фракции, для которых выделены соответствующие ячейки. Сетка ячеек размером $24n$ представляет собой полное пространство возможных состояний материала.

Основное уравнение для расчета содержания вещества по фракциям готового продукта представляет со-

бой произведение матрицы вероятности перехода G и матрицы первичного разделения по фракциям

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 \\ 1 - g_{11} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1^0 \\ f_2^0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где f_1 – содержание вещества в крупной фракции готового продукта; f_1^0 – содержание вещества в крупной фракции исходного продукта; g_{11} – вероятность нахождения вещества в крупной фракции; f_2 – содержание вещества в мелкой фракции готового продукта; f_2^0 – содержание вещества в мелкой фракции исходного продукта.

В данной работе рассматривается процесс измельчения, т.е. переход вещества в более мелкую фракцию. Процесс агрегации не рассматривается, как не свойственный данному процессу, поэтому элемент g_{12} принят равным нулю.

Элементы матрицы G рассчитываются по формуле Розина-Раммлера-Шперлинга-Беннета [4] (сокращенно Розина-Раммлера), которая получила наибольшее распространение для описания дисперсности вещества как за рубежом, так и в нашей стране:

$$R(x) = \exp\left(-\left(\frac{x}{x_{cp}}\right)^n\right), \quad (2)$$

где $R(x)$ – суммарный весовой выход частиц размером больше, чем x ; x_{cp} – средний размер частиц; n – постоянная равномерности.

Формула показывает, какой процент вещества имеет массу большую, чем масса частицы размером x .

При классификации исходный материал разделяется на два продукта:

мелкий и крупный. Поскольку время пребывания частиц в классификаторе обычно много меньше пребывания частиц в мельнице, то можно предположить, что за принятое время перехода вероятность для любой фракции остаться в классификаторе равна нулю [3].

Уравнение для расчета фракционного содержания на выходе классификаторов имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1^0 \\ f_2^0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где f_1 – массовое содержание крупной фракции на выходе из классификатора; f_1^0 – массовое содержание крупной фракции, поступающей на классификатор; C_1 – вероятность отсева содержимого крупной фракции в мелкий продукт; C_2 – вероятность отсева содержимого мелкой фракции в мелкий продукт; f_2 – массовое содержание мелкой фракции на выходе из классификатора; f_2^0 – массовое содержание мелкой фракции, поступающей на классификатор.

Процесс классификации вещества описывается формулой О. Молеруса, наиболее распространенной при анализе процессов сепарации вещества. Формула показывает вероятность выхода фракции в мелкий продукт или иными словами, какая часть вещества данной фракции отсеется в мелкое [5]:

$$C_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{cp}}{x_c}\right) \cdot \exp\left(-\frac{S}{2} \cdot \left(1 - \frac{x_{cp}}{x_c}\right)\right)}, \quad (4)$$

где x_{cp} – средний размер частиц фракции; x_c – граничный размер раз-

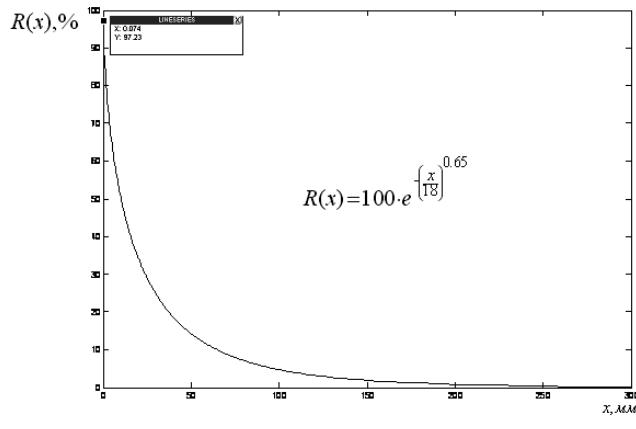


Рис. 3. Распределение проблескной руды по крупности для дробилки ДШЗ 1000/320

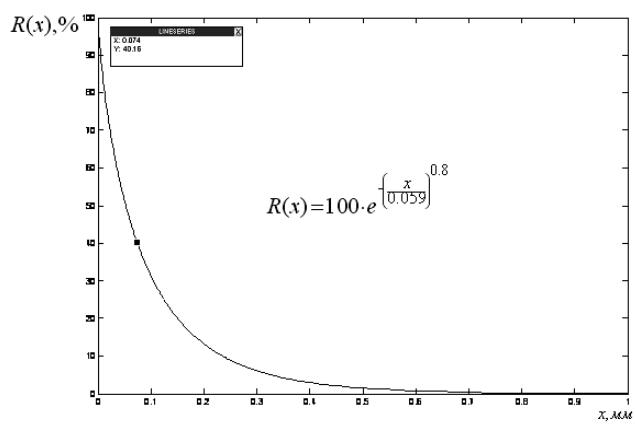


Рис. 4. Распределение измельченной руды по крупности для мельницы ММПС 70×70

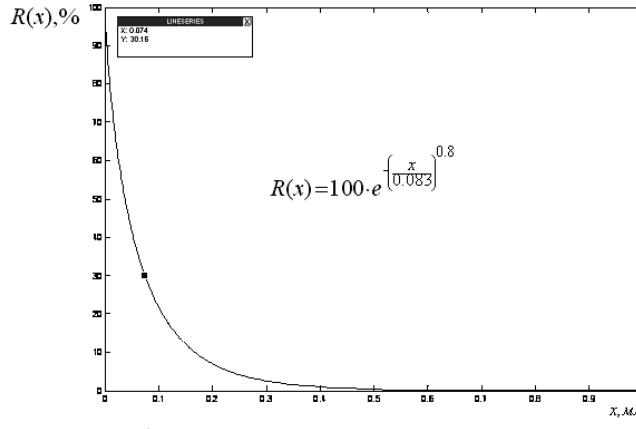


Рис. 5. Распределение измельченной руды по крупности для мельницы МШЦ 50 × 84

На рис. 3–5, приведены графики распределения измельченной руды по крупности, полученные с помощью зависимости Розина-Раммлера. Все

имеющиеся в формуле параметры были рассчитаны для конкретного оборудования, находящегося на исследуемом участке.

Как видно, при последовательном прохождении рудой процессов дробления, измельчения в мельнице мокрого полусамоизмельчения, а затем в шаровой мельнице, доля вещества, имеющая размер больший, чем интересующий нас размер 0,074 мм, постепенно уменьшается и после прохождения последней мельницы не превышает 30 %. Следует заметить, что в нагрузке шаровой мельницы присутствует материал рецикла и общее массовое содержание всех классов крупности будет больше, чем в продукте ММПС.

деления; S – параметр неидеальности процесса (процесс считается идеальным при $S \rightarrow +\infty$).

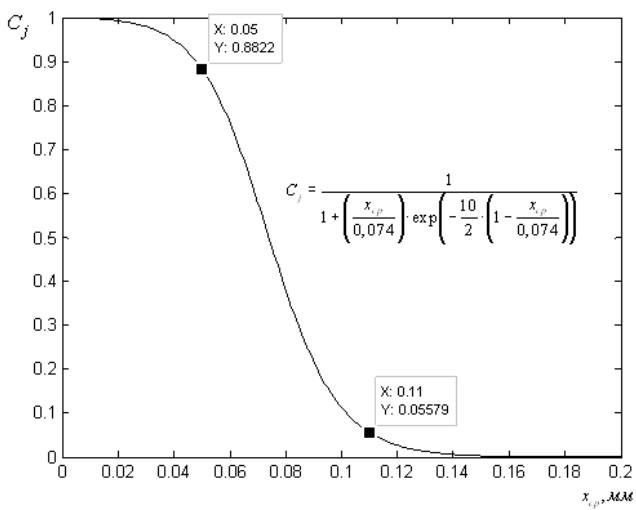


Рис. 6. Вероятность выхода фракции в мелкий продукт при классификации пульпы гидроциклонами ГЦР-500

тиц более 0,074 мм) и мелкую (со средним размером частиц меньше 0,074 мм).

Обе фракции поступают на измельчение в ММПС и МШЦ, где про

исходит перераспределение массопотока по классам крупности. В мельницу МШЦ поступает также пульпа, не отсеянная при классификации в мелкое.

Эта пульпа образует рециркулирующую нагрузку.

Насосная станция является управляемым объектом, за счет чего регулируется нагрузка классификаторов. Если уровень мощности потока на классификацию не совпадает с потоком из шаровой мельницы, то происходит изменение уровня пульпы в емкости.

Блок, описывающий процесс классификации, имеет три выхода: один выход мелкого продукта, отсевенного классификаторами в готовый продукт из крупной и мелкой фракций, и два выхода рециркулирующей нагрузки крупной и мелкой фракций, не прошедших отбор по крупности.

Следует отметить, что блок дробления расположен после вибропитателя, что не соответствует реальной последовательности агрегатов. Такое расположение не искажает описываемый процесс, но позволяет упростить процесс моделирования.

В результате проведенной работы было выявлено, что зависимость выходного потока руды от управляющего вибропитателем сигнала и зависимость массопотока пульпы в трубе от соот-

На рис. 6 показана вероятность выхода продукта соответствующей фракции в мелкое в зависимости от среднего размера частиц во фракции. Зависимость получена при помощи соотношения О. Молеруса для гидроциклонов ГЦР-500.

Как видно из графика, для класса крупности больше 0,074 при среднем размере 0,11 мм доля выхода вещества в мелкое составляет около 5 %, тогда как для мелкой фракции размером меньше 0,074 мм при среднем размере частиц 0,05 мм доля выхода вещества в мелкое – примерно 88 %.

Полученное выше математическое описание было использовано для создания модели в пакете прикладных программ MATLAB, блок-схема которой показана на рис. 7.

Полученная модель полностью описывает всю технологическую линию, приведенную на рис. 1. В блоке вибропитателя задаются максимально возможный поток руды и управляющее воздействие, определяющее массопоток на измельчение и классификацию. После дробления поток руды делится на две фракции: крупную (со средним размером час-

ветствующего управляющего воздействия носят экспоненциальный характер, что можно увидеть в реализации моделей этих устройств (рис. 8 и 9).

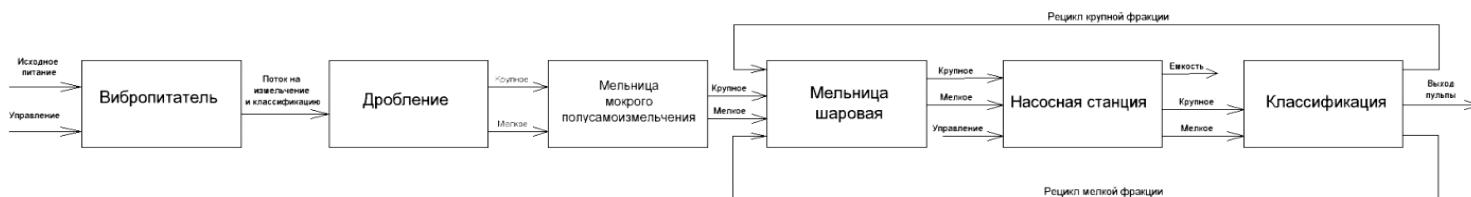


Рис. 7. Блок-схема модели процесса рудоизмельчения в ППП MATLAB

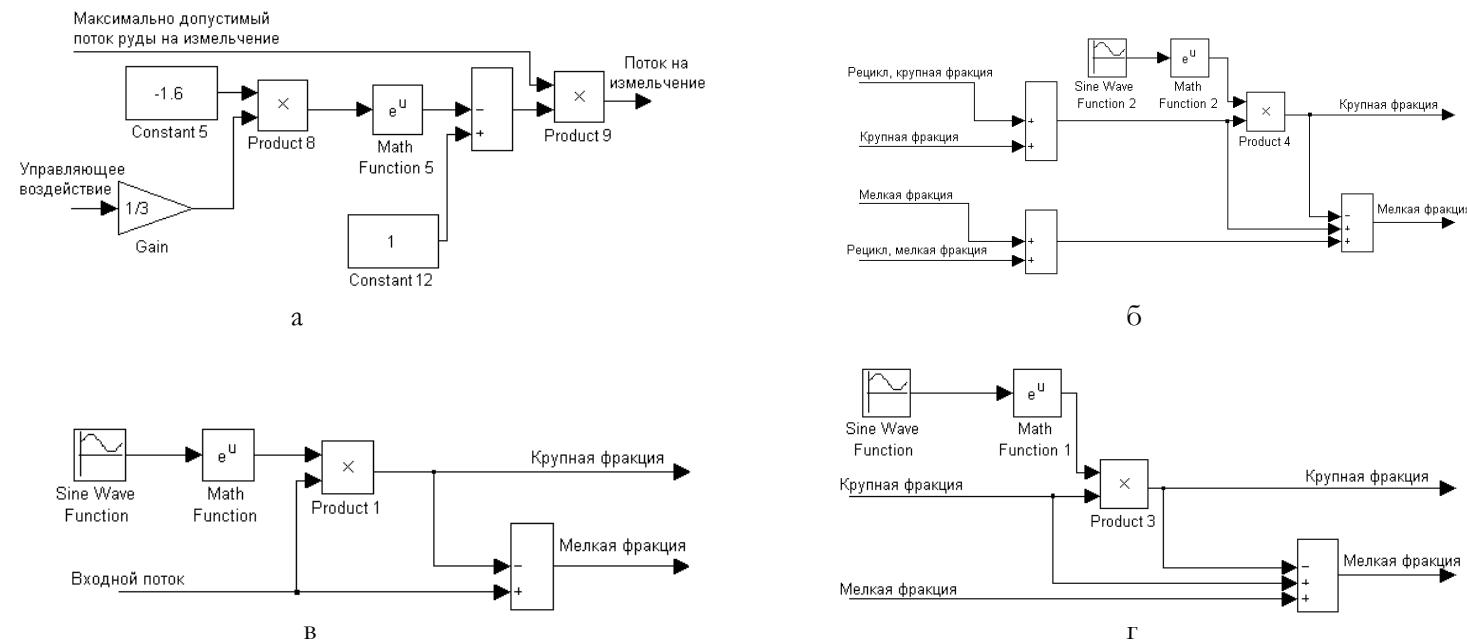
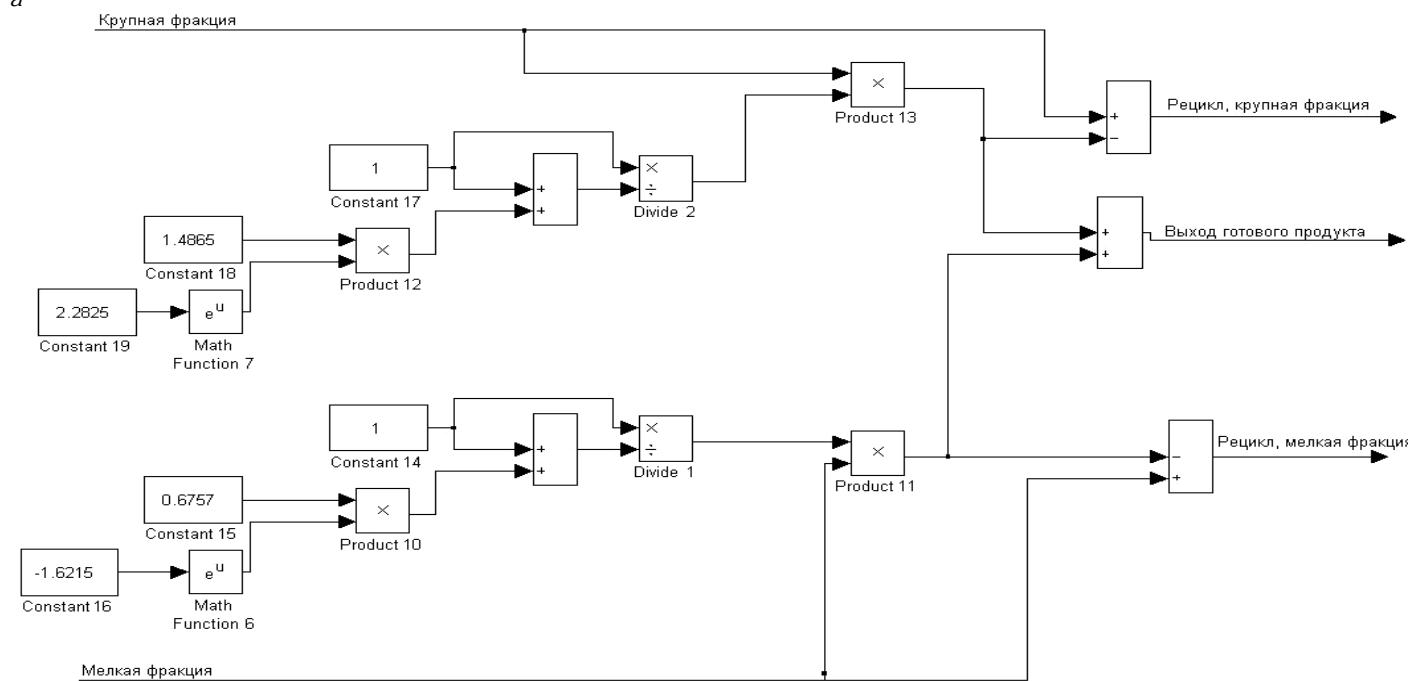


Рис. 8. Модели оборудования, расположенного на автоматизированном участке:
а – управляемый вибропитатель; б – шаровая мельница (МШИ); в – дробилка (ДШЗ); г – мельница мокрого полусамоизмельчения (ММПС)

a



б

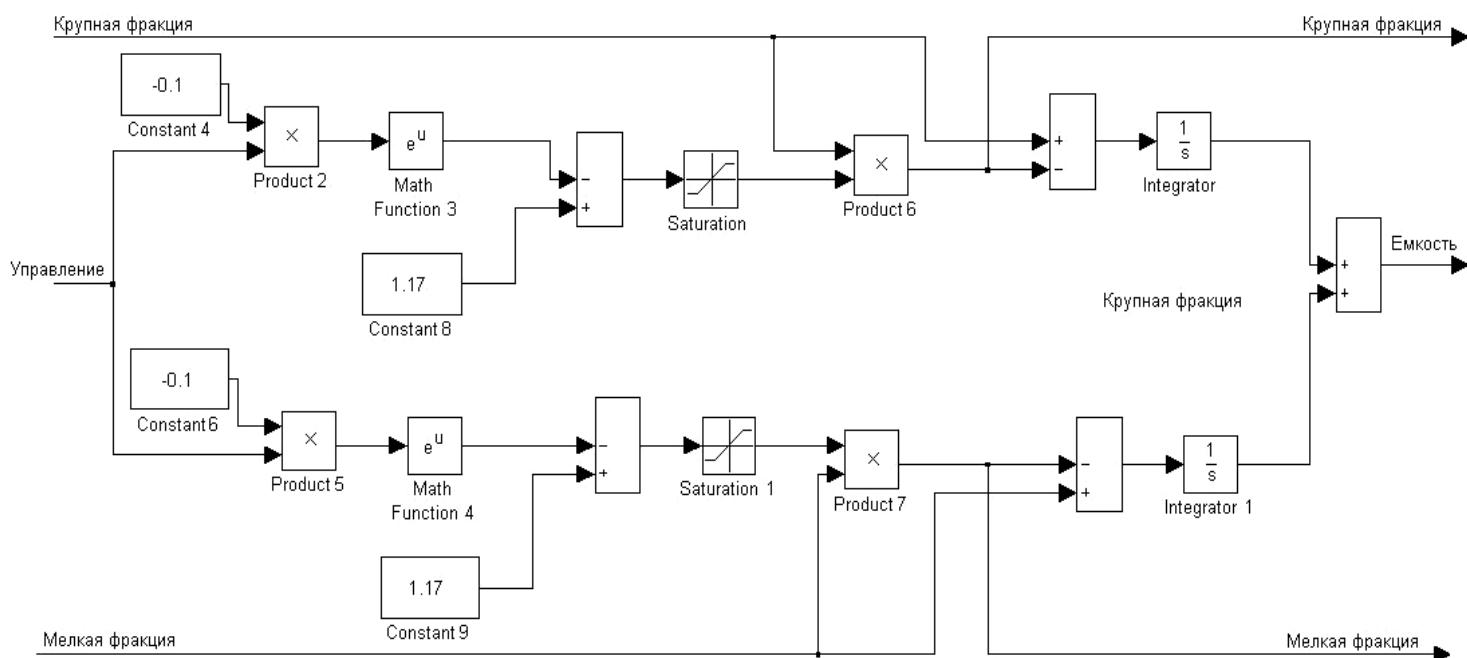


Рис. 9. Модели оборудования, расположенного на автоматизируемом участке:

а – управляемая насосная станция; *б* – гидроциклонные классификаторы

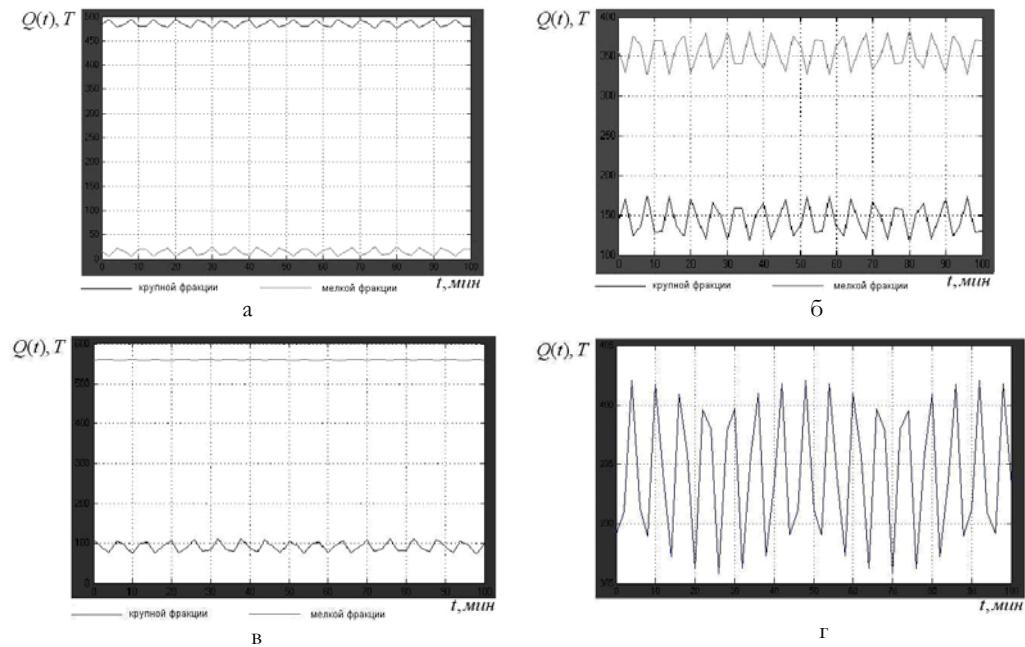


Рис. 10. Результаты моделирования основных стадий обработки руды: а – дробление; б – измельчение в мельнице мокрого полусамоизмельчения; в – измельчение в шаровой мельнице; г – выход готового продукта после классификации

Таблица 1

| Параметр | Технологические данные | Показатели модели |
|---|------------------------|-------------------|
| Дробление | | |
| Максимальная крупность куска после дробления, мм | 300 | 300 |
| Содержание класса – 0,074 мм в дробленом продукте, % | ~ 3 | 1 ч 3 |
| Полусамоизмельчение (мельница ММПС) | | |
| Средний размер куска после измельчения, мм | 0,06 | 0,059 |
| Содержание класса – 0,074 мм в измельченном продукте, % | ~ 60 | 57 ч 63 |
| Шаровое измельчение (мельница МШП) | | |
| Средний размер куска после измельчения, мм | 0,02 | 0,02 |
| Содержание класса – 0,074 мм в измельченном продукте, % | ~ 70 | 67 ч 73 |
| Гидроциклонная классификация | | |
| Массовая доля класса – 0,074 мм в сливе не ниже, % | ~ 88 | 88,2 |

В моделях мельниц и дробилки реализованы зависимости Розина-Раммлера для класса крупности 0,074 мм. Константы в этих зависимостях заменены функциями. Эта замена сделана для того, чтобы система наиболее полно соответствовала реальному процессу и эмулировала воздействия случайных величин и непостоянство качества измельчаемой руды, вызывающие колебания в массовом содержании руды каждой фракции.

На рис. 9 представлена модель управляемой насосной станции и гидроциклонных классификаторов. Модель гидроциклонов реализована на основе функции Молеруса соответственно для крупной и мелкой фракций. Результаты моделирования для основных характерных точек показаны на рис. 10. Как можно заметить, выход вещества каждой фракции не является постоянным и колеблется в определенных пределах. Видно, что при переходе вещества между агрегатами изменяется его фракционное содержание.

Выход готового продукта имеет непостоянное значение, а следовательно все оборудование, находящееся на следующих после рудоподго-

товки стадиях, будет претерпевать скачки в нагрузке, что крайне негативно влияет на их рабочие характеристики. Из чего сделан вывод, что необходимо проведение мероприятий по внедрению в систему соответствующих регуляторов.

Разработанная модель является в достаточной степени адекватной и описывает процессы близко к реальным по основным критериям, каковыми являются выход вещества определенного класса крупности и размер частиц в веществе (см. табл. 1).

В результате выполненных исследований, на базе теоретического рассмотрения физических процессов, протекающих при измельчении материала, и анализа существующих теорий разработано математическое описание основных процессов, составляющих процесс рудоподготовки, приемлемое для решения поставленных задач управления процессом и описывающее систему с достаточной степенью точности.

Разработанная модель является универсальной для процессов дробления и измельчения и может быть использована на фабриках с типовой схемой рудоподготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. – М.: Недра, 1981. – 343 с.
2. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Марков Е.Л. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств. – М.: Наука, 1986. – 358 с
3. Барский М.Д. Фракционирование порошков. – М.: Недра, 1980. – 372 с.
4. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Изд. 2-е, испр. – Л.: «Химия», 1974. – 280 с.
5. Веденников В.Б. Процессы разделения в газодисперсных средах. – Дисс. докт. техн. наук. – Свердловск, 1992. – 428 с.

ГИАБ

Коротко об авторах

Певзнер Л.Д. – профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой АТ,
Костиков В.Г. – профессор,
Леттиев О.А. – Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru