

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №1 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/79TVN116.pdf>

DOI: 10.15862/79TVN116 (<http://dx.doi.org/10.15862/79TVN116>)

Статья опубликована 12.04.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н. Нечётко-логический подход к моделированию процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом Акционерного Общества «Ковдорский горно-обогатительный комбинат» // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №1 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/79TVN116.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/79TVN116

Туз Андрей Александрович

АО «Ковдорский ГОК», Россия, Ковдор
Электромеханик

ФГБУН «Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского НЦ РАН»
Россия, Ковдор¹
Аспирант

E-mail: Andrew339@yandex.ru

РИНЦ: SPIN-код 5582-1684, http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=781153

Санаева Галина Николаевна

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»
Филиал в г. Новомосковск, Россия, Новомосковск
Старший преподаватель
E-mail: gn_san@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=791060

Пророков Анатолий Евгеньевич

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»
Филиал в г. Новомосковск, Россия, Новомосковск
Зав. кафедрой

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: prorokov@nmosk.ru

Богатиков Валерий Николаевич

ФГБОУ ВО «Тверской государственной технический университет», Россия, Тверь
Профессор кафедры «Информационных систем»

Доктор технических наук

E-mail: VNBGTK@mail.ru

**Нечётко-логический подход к моделированию процесса
измельчения в агрегате непрерывного действия
с замкнутым циклом Акционерного Общества
«Ковдорский горно-обогатительный комбинат»**

Аннотация. В статье рассматривается описание технологического процесса подготовки питания флотации в Акционерном Обществе "Ковдорский горно-обогатительный

¹ 184209, Мурманская обл., Апатиты г., ул. Ферсмана, 24а

комбинат"; показана технология мокрого измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом; приведены технологические параметры процесса обогащения; сформулированы основные цели управления технологическими процессами обогащения; приводится система оценки параметров модели процесса измельчения на основе нейро-фаззи сети и нечеткий метод оценки параметров модели; дана комбинированная кинетическая модель процесса измельчения; показана формализация лингвистических переменных для оценочной функции разрушения измельчаемого материала; приведен удельный расход электроэнергии на крупное дробление и измельчение в переделе обогащения руды на Акционерном Обществе "Ковдорский горно-обогатительный комбинат".

Ключевые слова: бадделеит-апатит-магнетитовые руды; апатит; бадделеитовый концентрат; обогащение полезных ископаемых; подготовка питания флотации; апатитовая флотация; "Ковдорский горно-обогатительный комбинат"; расход электроэнергии на измельчение и дробление; нейро-фаззи сети; система оценки параметров модели; кинетика; смешение; измельчение

Введение

В связи с дефицитом и высокими ценами фосфатного сырья на внутреннем и внешнем рынке руководством МХК «ЕвроХим» была поставлена задача и разработана программа обеспечения заводов компании фосфатами собственного производства, главным образом за счет увеличения объемов выпуска апатитового концентрата Ковдорским ГОКом до 3 млн т к 2015 г [1].

Одно из главных требований, предъявляемых к процессу измельчения – максимальная производительность измельчительных агрегатов [2]. По опубликованным данным [2], 90-95% всех расходов на измельчение зависят от производительности мельниц. Эти расходы изменяются обратно пропорционально изменению производительности мельниц. В таблице 1 представлен удельный расход электроэнергии на крупное дробление и измельчение [3].

Таблица 1

Удельный расход электроэнергии на крупное дробление и измельчение в переделе обогащения руды АО Ковдорский ГОК, кВт-ч/т руды [3]

Месяц	Крупное дробление в комплексе рудной ЦПТ		Измельчение в стержневых и шаровых мельницах	
	2009 г.	2010 г.	2009 г.	2010 г.
Январь	0,066	0,042	9,42	7,48
Февраль	0,058	0,055	8,47	7,19
Март	0,059	0,051	8,68	7,60
I квартал	0,061	0,049	8,86	7,42
Апрель	0,055	0,046	7,73	7,17
Май	0,049	0,047	8,04	7,37
Июнь	0,048	0,053	8,04	7,52
II квартал	0,051	0,048	7,94	7,35
Июль	0,051	0,052	7,68	7,57
Август	0,046	0,048	8,34	7,62
Сентябрь	0,051	0,034	8,04	7,35
III квартал	0,049	0,045	8,02	7,51

Месяц	Крупное дробление в комплексе рудной ЦПТ		Измельчение в стержневых и шаровых мельницах	
	2009 г.	2010 г.	2009 г.	2010 г.
Октябрь	0,051	0,042	7,45	7,79
Ноябрь	0,051	0,047	8,13	7,54
Декабрь	0,046	0,055	7,72	7,59
IV квартал	0,049	0,048	7,77	7,64
Год	0,053	0,048	8,14	7,48

Особенностью большого класса современных технологических процессов является наличие неопределенности параметров их функционирования как статистической, так и не статистической природы, которая объясняется отсутствием или неполнотой знаний о физико-химических параметрах процесса, широким спектром различных возмущающих и управляющих воздействий, присутствующих в реальных производственных системах и сложным характером их влияния.

Представителем такого класса процессов является процесс измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом.

Описание технологического процесса подготовки питания флотации

Технологический процесс подготовки питания апатитовой флотации апатито-бадделеитовой фабрики (АБОФ) АО Ковдорский ГОК, заключается в следующем. Хвосты магнито-обогащительной фабрики (МОФ), содержащие 30-32% верхнего класса +0,2 мм и 27-30% тонкого класса -0,071 мм подаются насосами пульпонасосной на гидроциклоны ГЦ-1400 апатито-бадделеитовой обогащительной фабрики (АБОФ), пески которых через стационарные сита поступают в пульподелитель цикла измельчения, смешиваясь в зумпфах с оборотной водой, для достижения необходимой плотности [4]. Далее насосами подаются на пульподелить вибрационных грохотов «Деррик».

В дальнейшем, после стадии грохочения, происходящей на определенной частоте, надрешетный продукт грохотов распределяется по мельничным зумпфам, откуда насосами подается на гидравлическую классификацию в гидроциклоны ГЦ-710, пески с которых самотёком поступают на доизмельчение в шаровые мельницы МШР 3600х5000, работающие в свою очередь в замкнутом цикле с данными гидроциклонами [4]. Операция измельчения также несет в себе свойство обновления поверхности минеральных зерен. [5]

Слив классифицирующих гидроциклонов, содержащий за счет подачи оборотной воды в мельничные зумпфы 25% твердого, поступает в радиальный сгуститель, из которого в слив сгустителя удаляются шламы. Сгущенный продукт с 50-53% твердого направляется на апатитовую флотацию [6].

В результате основной, двух контрольных и перечистных флотаций, операций сгущения, фильтрации и сушки на АО «Ковдорский ГОК» получают апатитовый концентрат с 37-38% P_2O_5 , при извлечении P_2O_5 от исходной руды до 53,1%. Технологические параметры процесса обогащения и конечного продукта представлены в таблице 2 [7].

Таблица 2

Технологические параметры процесса обогащения и конечного продукта-апатитового концентрата [7]

	Выход, %	Содержание, %			Извлечение P ₂ O ₅ , %
		P ₂ O ₅	MgO	CO ₂	
Продукт промывки	8,5	10,0	16,9	16,7	8,4
Шламы	6,4	11,2	19,6	15,1	7,2
Магнетитовый концентрат	0,7	0,46	6,5	1,3	0,2
Хвосты флотации	70,5	4,5	22,0	16,7	31,5
Апатитовый концентрат	13,9	38,3	1,0	3,3	52,7
Исходный продукт (руда)	100,0	10,5	18,2	14,2	100,0

На рисунке 1 представлена схема цепи аппаратов главного корпуса АБОФ [8].

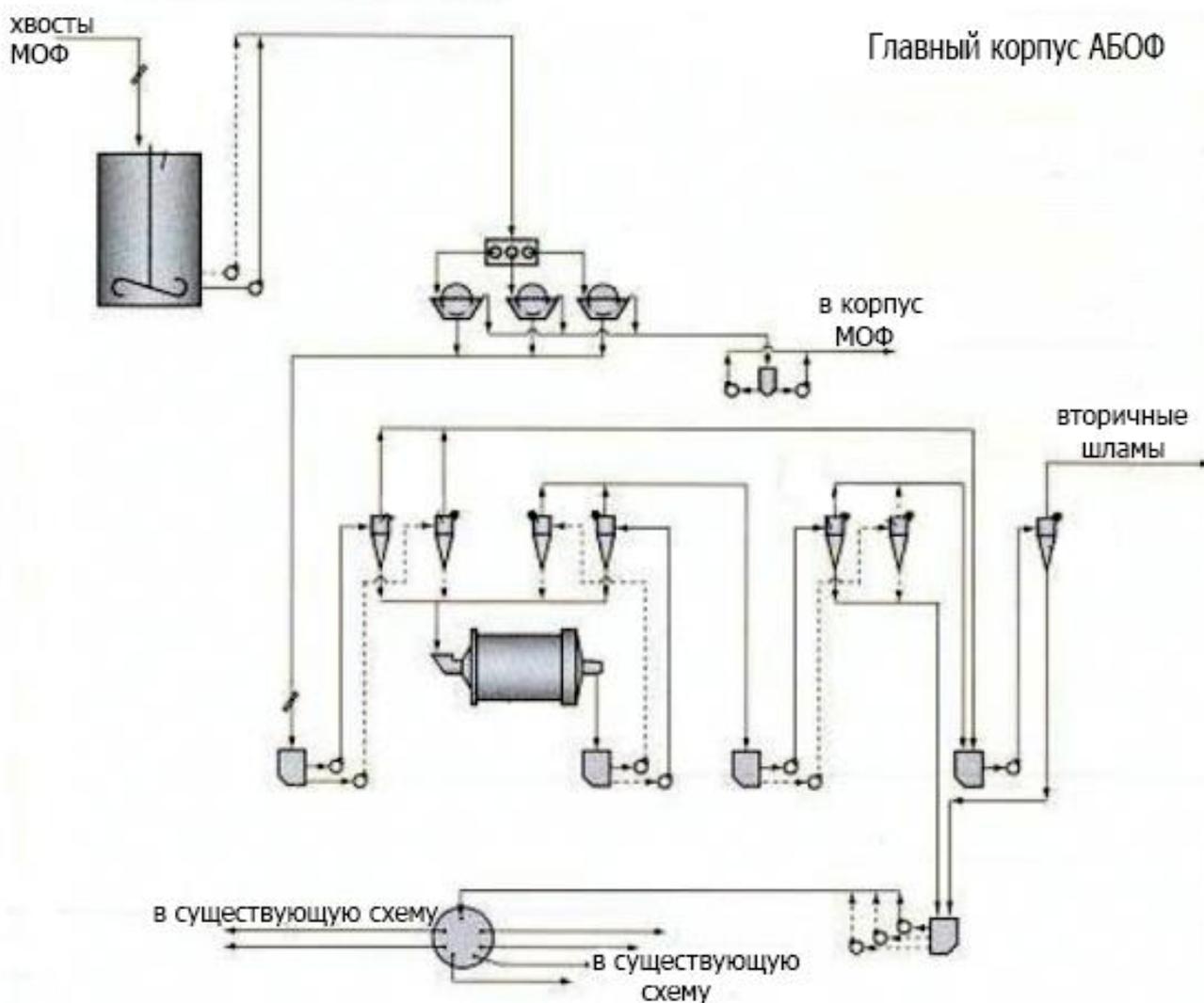


Рисунок 1. Схема цепи аппаратов главного корпуса АБОФ [8]

Технология мокрого измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом

Агрегат мокрого измельчения с замкнутым циклом представляет собой систему взаимосвязанных технологических аппаратов. Схема технологического процесса измельчения в таком агрегате представлена на рисунке 2.

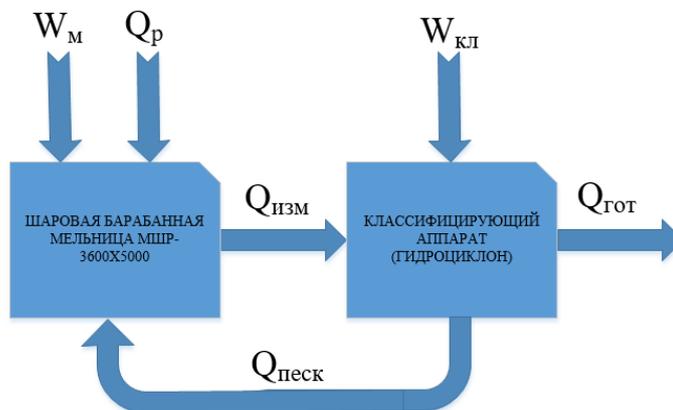


Рисунок 2. Схема технологического процесса измельчения в агрегате мокрого измельчения с замкнутым циклом (составлено автором)

Хвосты железорудного производства МОФ, поступающие в процесс доизмельчения на АБОФ, имеют различный минералогический состав: процентное содержание основных минералов и примесей. Минералы, входящие в состав хвостов, обладают различными физико-механическими свойствами: крепость; прочность на сжатие и растяжение; упругость и т.д. Хвосты МОФ характеризуются гранулометрическим составом – содержанием различных классов крупности частиц. Количество классов крупности – условное.

Минеральный состав апатит-карбонатит-силикатных песков представлен в таблице 3, а их гранулометрический состав в таблице 4 [7].

Таблица 3
Минеральный состав апатит-карбонатит-силикатных песков[7]

Класс крупности, мм	Минералы, %							
	Апатит	Форстерит	Карбонаты	Флогопит	Магнетит	Сульфиды	Бадделеит	Прочие
+0,2	3,5	6,0	4,5	83,5	Сл	Сл	Сл	Сл
-0,2+0,071	29,6	39,1	27,9	сл	Сл	Сл	Сл	Сл
-0,071	23,0	35,9	36,5	сл	Сл	Сл	Сл	Сл
Общая	25,2	36,5	32,2	4,2	0,5	0,3	Менее 0,3	0,8

Таблица 4

Гранулометрический состав апатит-карбонатит-силикатных песков[7]

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %			
		P ₂ O ₅	MgO	CO ₂	ZrO ₂
+0,2	3,9	7,4	19,4	14,3	0,057
-0,2+0,14	6,3	9,3	19,4	13,9	0,047
-0,14+0,1	10,5	10,2	19,4	14,1	0,055
-0,1+0,071	13,2	10,8	20,3	13,1	0,063
-0,071+0,05	21,6	11,3	19,0	13,0	0,19

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %			
		P ₂ O ₅	MgO	CO ₂	ZrO ₂
-0,05	44,5	11,0	17,3	14,7	0,41
Сумма	100,0	10,6	18,5	14,0	0,24

Рассмотрим процесс измельчения рудных материалов, происходящий в агрегате непрерывного действия. Внутрь барабана непрерывно подается измельчаемый материал, который проходит вдоль него и, подвергаясь воздействию дробящих тел, измельчается ударом, истиранием и раздавливанием. Измельченный продукт непрерывно разгружается.

Выходной продукт мельницы поступает в классифицирующий аппарат, где происходит разделение материала по крупности: песковая фракция $Q_{\text{песк}}$; готовый продукт измельчения $Q_{\text{гот}}$ (рис. 2, 3).

Песковая фракция поступает обратно в процесс измельчения, образуя циркулирующую нагрузку мельницы. Готовый продукт измельчения поступает в технологические процессы обогащения (апатитовая флотация).

Для повышения эффективности работы классифицирующего оборудования в процесс классификации подается вода [2].

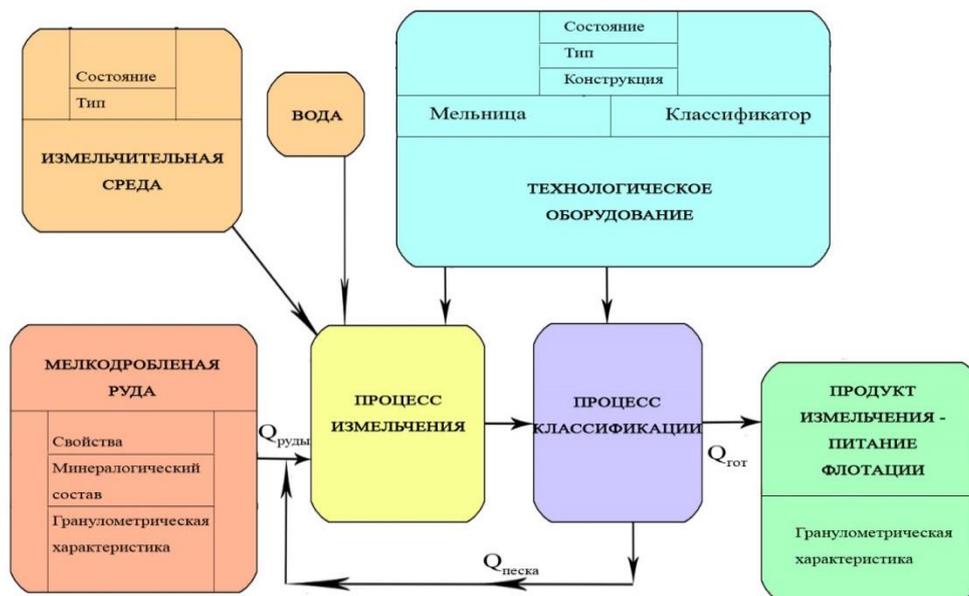


Рисунок 3. Обобщенная технология измельчения (составлено автором)

Обобщенная постановка задачи

Совершенствование процессов обогащения и создание наиболее эффективного оборудования возможно при решении вопросов автоматизации.

Основную цель автоматизации управления технологическими процессами обогащения, можно сформулировать следующим образом:

Обеспечение максимального извлечения полезного компонента и выпуска готовой продукции производства при заданном значении по качеству при минимальных затратах трудовых, энергетических и материальных ресурсов.

В этих условиях критерием экономической эффективности принимается, как правило, прибыль.

Применительно к АБОФ Ковдорского ГОКа качественными показателями апатитового концентрата являются:

$\beta_k^{P_2O_5}$ – содержание ценного компонента (P_2O_5) в концентрате;

$\beta_k^{+0,16}$ – содержание класса крупности +0,16 мм в концентрате (согласно ГОСТ).

Содержание полезного компонента в концентрате $\beta_k^{P_2O_5}$ зависит от суммарного содержания апатита и от технологического извлечения полезного компонента (P_2O_5) в концентрат ε в процессе обогащения.

Определенную роль в технологии измельчения играет фактическая удельная производительность мельниц $q_{0,16}^{факт}$, которая в своем приближении к $q_{0,16}^{max}$ зависит от способа управления процессом измельчения (ручной, автоматический) при оптимальном наполнении мельницы шарами заданного ассортимента и регламентном состоянии оборудования.

Система оценки параметров модели процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице на основе нейро-фаззи сети

Постановка задачи

В соответствии с поставленной задачей моделирования математическая модель процесса измельчения должна прогнозировать гранулометрический состав измельченного материала с учетом изменений его физико-механических свойств, а также состояния измельчительной среды.

Изменение физико-механических свойств перерабатываемого материала и состояния измельчительной среды приводит к изменению параметров модели.

Так коэффициенты b_{ij} в системе уравнений (1), определяющие функцию разрушения материала, зависят только от физико-механических свойств материала, которые в свою очередь определяются минералогическим составом рудного материала; коэффициенты S_i , определяющие функцию отбора материала, зависят как от свойств измельчаемого материала, так и от состояния шаровой загрузки.

Задачей, решаемой системой оценки параметров модели процесса измельчения, является прогнозирование функций отбора и разрушения измельчаемого рудного материала.

Нечёткий метод оценки параметров модели

Определение функций разрушения и отбора материала является весьма сложной задачей. Аналитические зависимости для функций разрушения и отбора, требуют большого количества априорной информации, для получения которой необходимо проведение дополнительных исследований.

Для аппроксимации зависимости функции разрушения материала от его минералогического состава предлагается использовать аппарат нечётких множеств, в соответствующие функции принадлежности подстраиваются с использованием алгоритмов обучения нейронных сетей [2, 9].

Комбинированная кинетическая модель процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице с открытым циклом

Технологический процесс сокращения крупности материала в шаровой барабанной мельнице может быть представлен моделью идеального перемешивания. При этом материальный баланс может быть представлен, как показано на рисунке 4 [2].

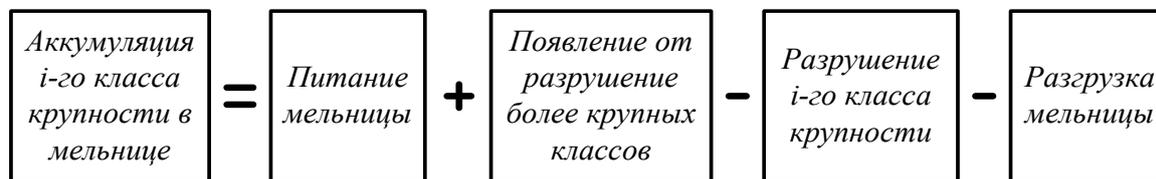


Рисунок 4. Материальный баланс мельницы идеального перемешивания [2]

Тогда дифференциальное уравнение, выражающее материальный баланс i -го класса крупности имеет вид:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{f_i}{\tau} - s_i\omega_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j\omega_j - \frac{\omega_i}{\tau} \quad (1)$$

где: ω_i – массовая доля i -го класса крупности, находящегося в мельнице;

f_i – массовая доля i -го класса крупности на входе (в питании) мельницы;

τ – время пребывания материала в мельнице;

s_i, s_j – функция разрушения, определяющая переход материала j -го класса в i -ый класс крупности;

b_{ij} – функция отбора, определяющая скорость разрушения соответственно i -го и j -го класса крупности.

При условии установившегося процесса уравнение материального баланса примет вид [10]:

$$\frac{f_i}{\tau} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j\omega_j = s_i\omega_i + \frac{\omega_i}{\tau} \quad (2)$$

В уравнении (1) можно от массовых долей ω_i перейти непосредственно к массам m_i

$$\omega_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i},$$

материала i -го класса крупности, находящегося в мельнице, исходя из того, что

$$\sum_i m_i = const$$

согласно закону сохранения массы .

Тогда уравнение (1) запишется в виде

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{f_i}{\tau} - s_i m_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j m_j - \frac{m_i}{\tau} \quad (3)$$

Кинетическое уравнение (1) и (3) предполагает, что время пребывания частиц различных классов крупности одинаково. В действительности всегда имеется некоторый разброс частиц по времени пребывания в мельнице. Этот разброс определяется перемешиванием и характеризуется функцией $E(t)$ называемой функцией распределения по времени пребывания или иначе функцией РВП:

$$E(t) = \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

где dP – вероятность того, что время пребывания частицы в аппарате лежит в интервале от t до dt .

Функция распределения по времени пребывания (РВП) может быть интерпретирована как зависимость концентрации трассера (некоторым образом меченных недробимых частиц) при его импульсном вводе на вход аппарата.

Разнообразие характеристик потока в реальных системах можно воспроизвести варьированием числа используемых зон идеального перемешивания и степени перемешивания между смежными зонами.

Учесть различное время пребывания частиц удастся, применив представление потока через мельницу в виде каскадных смесителей. Причем в большинстве случаев достаточно трех смесителей (А, В, С) в каскаде, если принять время пребывания в каждом смесителе соответственно равным:

$$\begin{aligned} \tau_A &= 0.15 \cdot \tau \\ \tau_B &= 0.15 \cdot \tau \\ \tau_C &= 0.70 \cdot \tau \end{aligned} \quad (5)$$

где: τ - общее время пребывания материала в мельнице.

На рисунке 5 [2] процесс измельчения представлен каскадом из трех смесителей (А, В, С). Поток частиц i -ой фракции (класса) крупности исходного материала q_{Fi} поступает на вход смесителя А. Поток разгружаемого из смесителя А материала является входным потоком q_{FVi} смесителя В, и, аналогично, поток разгружаемого из смесителя В материала является входным потоком q_{FCi} смесителя С. Каждый смеситель содержит запас (массу) материала m_{iA}, m_{iB}, m_{iC} , который подвергается измельчению.



Рисунок 5. Каскадное представление процесса измельчения [2]

С учетом выше изложенного кинетическое уравнение (3) для трех смесителей запишется в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dm_{iA}}{dt} &= \frac{f_{iA}}{\tau_A} - s_i m_{iA} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jA} - \frac{m_{iA}}{\tau_A} \\ \frac{dm_{iB}}{dt} &= \frac{f_{iB}}{\tau_B} - s_i m_{iB} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jB} - \frac{m_{iB}}{\tau_B} \\ \frac{dm_{iC}}{dt} &= \frac{f_{iC}}{\tau_C} - s_i m_{iC} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jC} - \frac{m_{iC}}{\tau_C} \end{aligned} \quad (6)$$

где:

m_{iA}, m_{iB}, m_{iC} – масса i -ой фракции (класса) крупности, находящегося соответственно в смесителе A, B, C ;

f_{iA}, f_{iB}, f_{iC} – масса i -ой фракции (класса) крупности на входе в соответственно в смесители A, B, C ;

τ_A, τ_B, τ_C – время пребывания в данном смесителе;

b_{ij} – функция разрушения, определяющая переход материала j -го класса в i -ый класс крупности;

s_i, s_j – функция отбора, определяющая скорость разрушения соответственно i -го и j -го класса крупности.

При разбиении входного потока измельчаемого материала на n классов крупности, например, для смесителя A получим систему из n уравнений (6), при этом предполагается, что разрушение самого мелкого n -го класса крупности не происходит.

Структурная схема системы дифференциальных уравнений (6) представлена на рисунке 6.

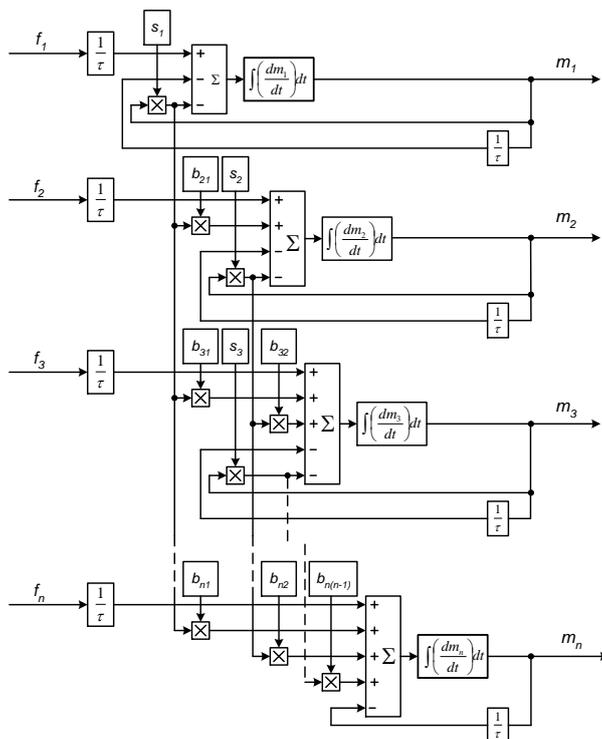


Рисунок 6. Структурная схема кинетики измельчения [2]

Оценка функции разрушения измельчаемого материала

Так как физико-механические свойства бадделеит-апатит-магнетитовых руд, после железорудного производства определяются минералогическим составом основных ценных минералов – апатита и бадделеита, на вход нечёткого экстраполятора будем подавать два входных параметра – содержание бадделеита β^{Bad} и суммарное содержание апатита и бадделеита β^{Ap+Bad} в руде.

Первоначально введем лингвистические переменные, определим их терм-множества и зададим функции принадлежности каждому терм-множеству лингвистической переменной.

Итак, имеем три лингвистические переменные:

- «содержание бадделеита в руде»;
- «суммарное содержание апатита и бадделеита в руде»;
- «коэффициент разрушения».

Формализация данных лингвистических переменных представлена в таблице 5 [2].

Таблица 5

Формализация лингвистических переменных [2]

Наименование лингвистической переменной	Область определения	Терм-множества	Область определения терм-множества
Содержание бадделеита в руде, %	[0, 100]	N_1 =«Очень низкое»	[0, 38]
		N_2 =«Низкое»	[36, 40]
		N_3 =«Среднее»	[38, 42]
		N_4 =«Повышенное»	[40, 44]
		N_5 =«Высокое»	[42, 46]
		N_6 =«Очень высокое»	[44, 100]
Суммарное содержание апатита и бадделеита в руде, %	[0, 100]	C_1 =«Очень низкое»	[0, 68]
		C_2 =«Низкое»	[65, 71]
		C_3 =«Среднее»	[68, 74]
		C_4 =«Повышенное»	[71, 77]
		C_5 =«Высокое»	[74, 80]
		C_6 =«Очень высокое»	[77, 100]
Коэффициент разрушения	[0, 1]	B_1	[0; 0,1]
		B_2	[0,1; 0,2]
		B_3	[0,2; 0,3]
		B_4	[0,3; 0,4]
		B_5	[0,4; 0,5]
		B_6	[0,5; 0,6]
		B_7	[0,6; 0,7]
		B_8	[0,7; 0,8]
		B_9	[0,8; 0,9]
		B_{10}	[0,9; 1,0]

Функции принадлежности терм-множествам входных лингвистических переменных имеют вид:

для $l = 1$

$$\mu_l(x) = \frac{1}{1 + \exp(c_l(x - d_{l1}))} \quad (7)$$

для $l = 2, 3, 4, 5$

$$\begin{aligned} \mu_l(x) &= \frac{1}{1 + \exp(c_l(x - d_{l1}))}, & \text{при } x \geq a_l \\ \mu_l(x) &= \frac{1}{1 + \exp(-c_l(x - d_{l1}))}, & \text{при } x \leq a_l \end{aligned} \quad (8)$$

для $l = 6$

$$\mu_l(x) = \frac{1}{1 + \exp(-c_l(x - d_{l2}))} \quad (9)$$

где: a_l – мода нечеткого числа ($\mu_l(a_l) = 1$);

c_l, d_{l1}, d_{l2} – параметры функции принадлежности;

l – индекс терм-множества.

Параметры функций принадлежности входных лингвистических переменных представлены в таблице 6 [2].

Функция принадлежности терм-множествам выходной лингвистической переменной имеет вид:

$$\mu_l(x) = \frac{1}{1 + \exp(c_l(x - d_l))} \quad (10)$$

где l – индекс терм-множества.

Начальные параметры функций принадлежности выходной лингвистической переменной представлены в таблице 7 [2].

Таблица 6

Параметры функций принадлежности терм-множествам входных лингвистических переменных [2]

Лингвистическая переменная	Терм-множество	l	Параметры функции принадлежности			
			a_l	c_l	d_{l1}	d_{l2}
Содержание бадделеита в руде, %	N_l	1	–	5	37	–
		2	38	5	39	37
		3	40	5	41	39
		4	42	5	43	41
		5	44	5	45	43
		6	–	5	–	45

Лингвистическая переменная	Терм-множество	l	Параметры функции принадлежности			
			a_l	c_l	d_{l1}	d_{l2}
Суммарное содержание апатита и бадделеита в руде, %	C_l	1	–	5	66,5	–
		2	68	5	69,5	66,5
		3	71	5	72,5	69,5
		4	74	5	75,5	72,5
		5	77	5	78,5	75,5
		6	–	5	–	78,5

Таблица 7

Начальные параметры функций принадлежности терм-множествам выходной лингвистической переменной [2]

Лингвистическая переменная	Терм-множество	j	Параметры функции принадлежности	
			c_j	d_j
Коэффициент разрушения	B_j	1	50	0,05
		2	50	0,15
		3	50	0,25
		4	50	0,35
		5	50	0,45
		6	50	0,55
		7	50	0,65
		8	50	0,75
		9	50	0,85
		10	50	0,95

Определение нечеткого значения коэффициента b_{ij} строится на основании набора правил R_{ij} логического вывода, хранящегося в базе знаний системы.

Каждый набор правил R_{ij} логического вывода, имеющий вид

П₁: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_1 И β^{Ap+Bad} есть C_1 ТОГДА b есть B_k ;

П₂: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_1 И β^{Ap+Bad} есть C_2 ТОГДА b есть B_k ;

П₃: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_1 И β^{Ap+Bad} есть C_3 ТОГДА b есть B_k ;

П₄: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_1 И β^{Ap+Bad} есть C_4 ТОГДА b есть B_k ;

П₅: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_1 И β^{Ap+Bad} есть C_5 ТОГДА b есть B_k ;

П₆: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_2 И β^{Ap+Bad} есть C_1 ТОГДА b есть B_k ;

П₇: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_2 И β^{Ap+Bad} есть C_2 ТОГДА b есть B_k ;

П₈: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_2 И β^{Ap+Bad} есть C_3 ТОГДА b есть B_k ;

- П₉: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_2 И β^{Ap+Bad} есть C_4 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₀: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_2 И β^{Ap+Bad} есть C_5 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₁: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_3 И β^{Ap+Bad} есть C_1 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₂: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_3 И β^{Ap+Bad} есть C_2 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₃: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_3 И β^{Ap+Bad} есть C_3 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₄: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_3 И β^{Ap+Bad} есть C_4 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₅: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_3 И β^{Ap+Bad} есть C_5 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₆: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_4 И β^{Ap+Bad} есть C_1 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₇: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_4 И β^{Ap+Bad} есть C_2 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₈: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_4 И β^{Ap+Bad} есть C_3 ТОГДА b есть B_k ;
- П₁₉: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_4 И β^{Ap+Bad} есть C_4 ТОГДА b есть B_k ;
- П₂₀: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_4 И β^{Ap+Bad} есть C_5 ТОГДА b есть B_k ;
- П₂₁: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_5 И β^{Ap+Bad} есть C_1 ТОГДА b есть B_k ;
- П₂₂: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_5 И β^{Ap+Bad} есть C_2 ТОГДА b есть B_k ;
- П₂₃: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_5 И β^{Ap+Bad} есть C_3 ТОГДА b есть B_k ;
- П₂₄: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_5 И β^{Ap+Bad} есть C_4 ТОГДА b есть B_k ;
- П₂₅: ЕСЛИ β^{Bad} есть N_5 И β^{Ap+Bad} есть C_5 ТОГДА b есть B_k ;

может быть представлен в виде решающей таблицы 8[2].

Таблица 8

Решающая таблица нечеткого логического вывода [2]

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
N_1	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_2	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_3	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_4	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_5	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k

где $k = 1, 2, \dots, 10$.

Входными переменными нечёткой модели являются содержания основных ценных минералов (β^{Bad} , β^{Ap+Bad}), определяющих физико-механические свойства измельчаемого материала (бадделеит-апатит-магнетитовой руды, после железорудного производства).

В первом слое нейро-фаззи сети проводится фаззификация входных переменных. Выходы узлов первого слоя представляют собой значения функций принадлежности термножеств конкретных значений соответствующих входных переменных.

Проверка адекватности модели

Проверка адекватности модели проводилась по статистическим данным работы участка подготовки питания флотации АБОФ Ковдорского ГОКа. На графиках (рис. 7) представлено прогнозное (по модели) и измеренное изменение содержание класса крупности +0,16 мм в сливе классификатора.

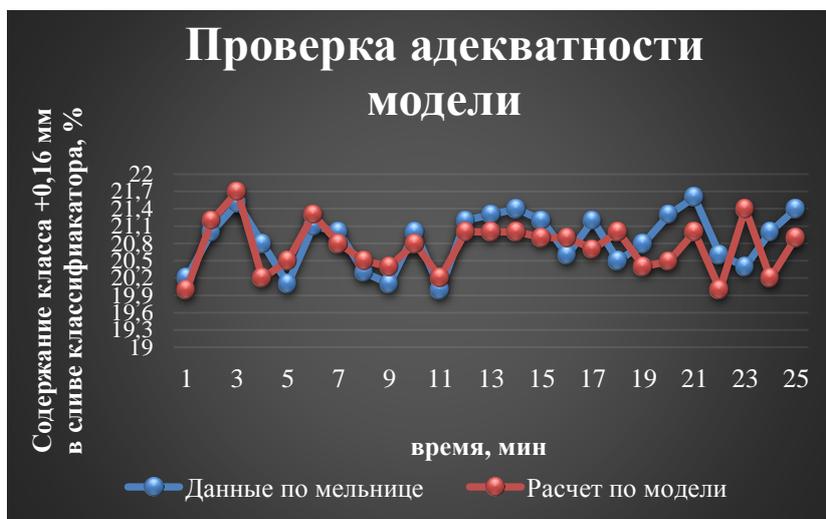


Рисунок 7. Прогнозное (по модели) и измеренное изменение содержание класса крупности +0,16 мм в сливе классификатора (составлено автором)

На графиках (рис. 8) представлены результаты ситового анализа и прогнозное процентное содержание двенадцати классов крупности готового продукта измельчения.



Рисунок 8. Проверка адекватности модели (составлено автором)

По результатам проведенной проверки можно сделать вывод, что разработанная модель вполне адекватна.

Заключение:

В статье были рассмотрены в общем виде подходы к моделированию технологического процесса измельчения. Показан ряд факторов, определяющих производительность процесса измельчения. Приводится потенциальная необходимость использования нечеткого моделирования для эффективного управления технологическим процессом измельчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрежнев Д.С., Мелик-Гайказов И.В., Ганза Н.А., Черевко Н.В. 50 лет по пути инновационного развития // Горный журнал. 2012. №10. С. 7–11.
2. Кулаков А.Г. Ситуационное управление технологической безопасностью процесса измельчения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук М., 2008.
3. Шилов В.И., Тюков Н.С., Костенко В.И. Основные направления развития и совершенствования систем энергообеспечения производственной деятельности Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2012. №10. С. 86–89.
4. Сидоренков А.П., Обухов В.А., Волкович Ю.А., Смирнов Д.С., Тесля А.С. Технико-технологическое перевооружение действующих мощностей обогатительного комплекса // Горный журнал. 2007. №9. С. 50-53.
5. Тарасов Г.Е., Попович В.Ф., Бармин И.С., Новожилова В.В. и др. Нарращивание мощностей по производству апатитового и бадделеитового концентратов на ОАО «Ковдорский ГОК».
6. Режим доступа: <http://www.kar-met.ru/pererabotka-otkhodov-prirodopolzovaniya/pererabotka-otkhodov-prirodopolzovaniya-str35.html>.
7. Способ обогащения апатитсодержащих руд. Пат. 2342199 Россия, МПК В03Д 1/00/ Мелик-Гайказов И.В., Попович В.Ф., Бармин И.С., Белобородов В.И., Захарова И.Б., Филимонова Н.М., Андронов Г.П., опубл. 27.12.2008 Бюл. №36.
8. Бочаров С.Н., Кузнецов В.С., Шендерович Е.М., Кузьмин К.Б. Технологический комплекс переработки песков техногенного месторождения // Горный журнал. 2007. №9. С. 56-58.
9. Богатиков В.Н., Исследование агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом как объекта автоматического управления / В.Н. Богатиков, А.Г. Кулаков // Информационные технологии в региональном развитии. Выпуск IV. Сборник научных трудов ИИММ КНЦ РАН. Апатиты. 2004. С. 80-91.
10. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: М., Недра, 1981, 243 с.

Tuz Andrey Aleksandrovich

Joint-stock company «Kovdorskiy GOK», Russia, Kovdor
Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modelling of
Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Russia, Kovdor
E-mail: Andrew339@yandex.ru

Sanaeva Galina Nikolaevna

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Novomoskovsk branch, Russia, Novomoskovsk
E-mail: gn_san@mail.ru

Prorokov Anatoliy Evgenyevich

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Novomoskovsk branch, Russia, Novomoskovsk
E-mail: prorokov@nmosk.ru

Bogatikov Valeriy Nikolaevich

Tver State Technical University, Russia, Tver
E-mail: VNBGTK@mail.ru

**Fuzzy logic approach to modeling of the grinding process in the
unit of continuous action with a closed cycle of Joint Stock
Company «Kovdorsky mining-and-processing plant»**

Abstract. The article deals with the description of the technological process of food preparation in the flotation of Joint Stock Company "Kovdorsky mining and processing plant"; the technology of wet grinding in unit of continuous action with a closed cycle; given technological parameters of the enrichment process; formulated the main objectives of management technology of enrichment processes; provides a system of assessment of model parameters of the grinding process on the basis of neuro-fuzzy networks and fuzzy evaluation method of the model parameters; given the combined kinetic model of the grinding process; It shows the formalization of the linguistic variables for the evaluation function destruction of crushed material; given the specific consumption of electricity biggest crushing and grinding in the redistribution of ore dressing at Joint Stock Company "Kovdorsky mining and processing plant".

Keywords: baddeleyite-apatite-magnetite ores; Apatite; baddeleyite concentrate; mineral processing; preparation of food flotation; Apatite flotation; "Kovdorsky mining and processing plant"; electricity consumption for grinding and crushing; neuro-fuzzy network; the system estimates of the model parameters; kinetics; mixing; grinding

REFERENCES

1. Strezhnev D.S., Melik-Gaykazov I.V., Ganza N.A., Cherevko N.V. 50 let po puti innovatsionnogo razvitiya // Gornyy zhurnal. 2012. №10. S. 7–11.
2. Kulakov A.G. Situatsionnoe upravlenie tekhnologicheskoy bezopasnost'yu protsessa izmel'cheniya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk M., 2008.
3. Shilov V.I., Tyukov N.S., Kostenko V.I. Osnovnye napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya sistem energoobespecheniya proizvodstvennoy deyatel'nosti Kovdorskogo GOKa // Gornyy zhurnal. 2012. №10. S. 86–89.
4. Sidorenkov A.P., Obukhov V.A., Volkovich Yu.A., Smirnov D.S., Teslya A.S. Tekhniko-tekhnologicheskoe perevooruzhenie deystvuyushchikh moshchnostey obogatitel'nogo kompleksa // Gornyy zhurnal. 2007. №9. S. 50-53.
5. Tarasov G.E., Popovich V.F., Barmin I.S., Novozhilova V.V. i dr. Narashchivanie moshchnostey po proizvodstvu apatitovogo i baddeleitovogo kontsentratov na OAO «Kovdorskiy GOK».
6. Rezhim dostupa: <http://www.kar-met.su/pererabotka-otkhodov-prirodopolzovaniya/pererabotka-otkhodov-prirodopolzovaniya-str35.html>.
7. Sposob obogashcheniya apatitsoderzhashchikh rud. Pat. 2342199 Rossiya, MPK B03D 1/00/ Melik-Gaykazov I.V., Popovich V.F., Barmin I.S., Beloborodov V.I., Zakharova I.B., Filimonova N.M., Andronov G.P., opubl. 27.12.2008 Byul. №36.
8. Bocharov S.N., Kuznetsov V.S., Shenderovich E.M., Kuz'min K.B. Tekhnologicheskii kompleks pererabotki peskov tekhnogennoho mestorozhdeniya // Gornyy zhurnal. 2007. №9. S. 56-58.
9. Bogatikov V.N., Issledovanie agregata mokrogo izmel'cheniya s zamknutym tsiklom kak ob"ekta avtomaticheskogo upravleniya / V.N. Bogatikov, A.G. Kulakov // Informatsionnye tekhnologii v regional'nom razvitii. Vypusk IV. Sbornik nauchnykh trudov IIMM KNTs RAN. Apatity. 2004. S. 80-91.
10. Linch A.Dzh. Tsikly drobleniya i izmel'cheniya. Modelirovanie, optimizatsiya, proektirovanie i upravlenie: M., Nedra, 1981, 243 s.