

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

Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/93TVN216.pdf>

DOI: 10.15862/93TVN216 (<http://dx.doi.org/10.15862/93TVN216>)

Статья опубликована 19.04.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н., Кулаков А.Г. Системы автоматического регулирования агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом на основе нечеткоопределенных моделей // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/93TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/93TVN216

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

Кулаков Андрей Геннадьевич

АО «Апатит», Россия, г. Апатиты

Главный механик

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: AGKulakov1968@yandex.ru

**Системы автоматического регулирования агрегата
мокрого измельчения с замкнутым циклом на основе
нечеткоопределенных моделей**

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

Аннотация. В статье описана технология измельчения на апатито-бадделеитовой обогатительной фабрике. Приведены технические характеристики используемого оборудования. Рассматривается технологический процесс измельчения как объект управления. Приводятся переменные состояния, характеризующие процесс классификации. Показаны входные и выходные параметры объекта управления. Производится оценка состояния процесса измельчения бадделеит-apatит-магнетитовых руд. Дается формализация лингвистических переменных по различным критериям. Определение центра технологической безопасности процесса измельчения. Формирование функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной по различным критериям. Расчет центра безопасности по различным технологическим параметрам. Приведен алгоритм управления технологическим процессом измельчения бадделеит-apatит-магнетитовых руд. Сформирована блок-схема алгоритма управления технологическим процессом измельчения бадделеит-apatит-магнетитовых руд. Показана функциональная схема адаптивной системы ситуационного управления.

Ключевые слова: бадделеит-apatит-магнетитовые руды; апатит; бадделеитовый концентрат; обогащение полезных ископаемых; подготовка питания флотации; апатитовая флотация; "Ковдорский горно-обогатительный комбинат"; расход электроэнергии на измельчение и дробление; система оценки параметров модели; кинетика; смешение; измельчение; мельница; гидроциклон; центр технологической безопасности; нечеткая логика

Технология измельчения на апатито-бадделеитовой обогатительной фабрике

Хвосты железорудного производства с магнито-обогатительной фабрики Ковдорского ГОКа насосами пульпонасосной станции ПНС подаются на апатито-бадделеитовую обогатительную фабрику (АБОФ).

Из пульповой аккумулирующей емкости АБОФ питание подается на пульподелитель, проходя через секцию магнитных сепараторов, направляется в промежуточный зумпф, откуда пульповыми насосами подается на гидравлическую классификацию в гидроциклоны ГЦП-360, пески с которых направляются на доизмельчение в шаровую мельницу МШР 3600×5000 [1].

Слив мельницы направляется в мельничный зумпф, где в целях достижения необходимой плотности смешивается с водой и в дальнейшем подается на классификацию в гидроциклоны ГЦП-500, пески которого являются циркулирующей нагрузкой мельницы [2, 3]. Сливы гидроциклонов ГЦП-360 и ГЦП-500 в дальнейшем объединяются и после промежуточных операций являются исходным питанием флотации. В таблице 1 приведена техническая характеристика мельницы типа МШР 3600×5000 [5].

Таблица 1

Техническая характеристика мельницы типа МШР 3600×5000 [5]

Тип мельницы	Мельница барабанная шаровая с центральной разгрузкой типа МШР 3600×5000
Размеры, мм	D=3600 L=5000
Частота вращения, об/мин	14,5
Рабочий объём мельницы, м ³	140
Шаровая загрузка, тонн	110
Мощность электродвигателя, кВт	1300

Боковая футеровка мельниц имеет волнистую поверхность. Коэффициент заполнения мельниц шарами – 42%.

Для шаровых мельниц установлена первоначальная загрузка шаров по количеству и гранулометрическому составу 110 т.

Кроме того, регламентирован ассортимент шаров, загружаемых для компенсации износа шаровой загрузки (табл. 2).

Таблица 2

Ассортимент шаров, загружаемых для компенсации износа шаровой загрузки [5]

Диаметр шаров, мм	100	80	60
Начальная шаровая загрузка, %	25	50	25
Загрузка шаров на износ, %	40	60	

Догрузка шаров с целью компенсации их износа производится несколько раз в месяц из расчёта утвержденной годовой нормы расхода на 1 тонну переработанной руды. По мере износа футеровки производится добавочная загрузка шаров на увеличение объёма мельницы.

Мельницы МШР 3600×5000 работают в замкнутом цикле с гидроциклонами ГЦ-360 и ГЦ-500 [1]. Технические характеристики гидроциклонов представлены в таблице 3.

Пески гидроциклонов ГЦ-360 и ГЦ-500 объединяются и самотёком возвращаются в мельницу МШР 3600×5000. Общая циркуляционная нагрузка мельницы по пескам составляет 200-300%. Техническая характеристика используемых гидроциклонов приведена в таблице 3.

Таблица 3

Техническая характеристика гидроциклонов [составлено автором]

Тип гидроциклона	ГЦ-360	ГЦ-500
Диаметр пескового отверстия d_n , мм (предельное откл. ±1,5%)	95	110
Диаметр сливной насадки, мм	125	150
Давление на входе, кг/см ²	0,3-2,5	0,3-2,5
Производительность по питанию с содержанием твёрдого 40% при давлении 0,1 МПа, м ³ /ч. не менее	95	140

Измельчение руды ведётся до крупности 22 – 28% класса +0,16 мм, что обеспечивает раскрытие зёрен апатита и крупность получаемого апатитового концентрата не более 13,5% класса +0,16 мм. Содержание твёрдого в сливе гидроциклонов 25%. Степень раскрытия и состояние зерен апатита в различных классах крупности приводится в таблице 4 [3, 4].

Таблица 4

Степень раскрытия и состояние зерен апатита в различных классах крупности

Классы крупности, мм	Свободные зерна	Сростки	Зерна с пленками на поверхности
+0,315	23,1	35,2	41,7
-0,315+0,20	11,2	28,3	61,5
-0,20+0,16	9,3	22,4	68,3

Классы крупности, мм	Свободные зерна	Сростки	Зерна с пленками на поверхности
-0,16+0,10	10,2	18,2	71,6
-0,10+0,071	22,3	8,5	69,2
-0,071	47,5	3,5	49,0
Среднее	24,4	17,4	58,2

Схема цепи аппаратов технологического процесса измельчения на АБОФ представлена на рисунке 1 [5].

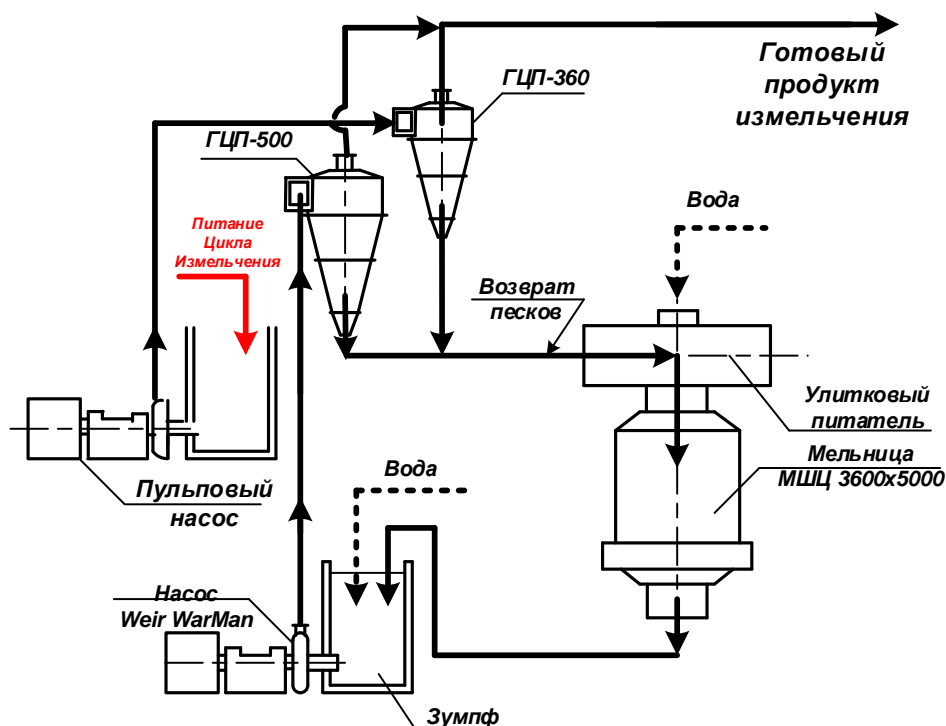


Рисунок 1. Схема цепи аппаратов технологического процесса измельчения [5]

Технологический процесс измельчения как объект управления

Рассмотрим технологический процесс измельчения с замкнутым циклом с точки зрения управления [4, 5].

К входным параметрам рассматриваемого объекта управления относятся:

- производительность пульпового насоса по количеству подаваемой пульпы Q_p ;
- гранулометрическая характеристика исходной руды R_p ;
- технологические свойства перерабатываемой руды F_p ;
- расход воды в мельницу W_M ;
- расход воды в классифицирующий аппарат $W_{КЛ}$.

Процесс измельчения с замкнутым циклом с технологической точки зрения можно разбить на два взаимосвязанных процесса: непосредственно процесс сокращения крупности материала (измельчение) и процесс классификации измельченного продукта.

Процесс сокращения крупности материала (измельчение) характеризуется переменными состояниями, к которым относятся:

- запас материала в мельнице M ;
- заполнение мельницы измельчающей средой (шарами) $\varphi_{Ш}$;
- внутренний объем мельницы V ;
- техническое состояние оборудования (мельницы) S_M .

К внутренним переменным процесса можно отнести:

- циркуляционная нагрузка мельницы $Q_{неск}$;
- гранулометрическая характеристика циркуляционной нагрузки $R_{неск}$;
- выход пром. продукта мельницы Q_M ;
- гранулометрическая характеристика пром. продукта S_M .

Процесс классификации измельченного материала также характеризуется переменными состояниями, к которым относятся [5, 6]:

- техническое состояние оборудования (гидроциклоны, спиральный классификатор и гидроциклонные насосы) $S_{кл}$.

Возмущающими воздействиями для данного технологического процесса будут являться:

- изменение гранулометрической характеристики исходной руды ΔR_p ;
- изменение технологических свойств перерабатываемой руды ΔF_p ;
- изменение заполнения мельницы шарами в результате их износа и выноса мелких шаров из процесса $\Delta \varphi_{Ш}$;
- изменение внутреннего объема мельницы в результате износа защитной футеровки ΔV ;
- изменение технического состояния классифицирующего оборудования $\Delta S_{кл}$ и технического состояния мельницы ΔS_M .

Выходными параметрами объекта управления будут являться:

- производительность агрегата по готовому продукту измельчения $Q_{гот}$;
- гранулометрическая характеристика готового продукта измельчения $R_{гот}$;
- мощность, потребляемая мельницей $N_{номр}$.

Вектор управления технологическим процессом измельчения представлен следующими воздействиями:

- изменение производительности пульпового насоса по количеству подаваемой пульпы ΔQ_p ;

- изменение расхода воды в мельницу ΔW_M ;
- изменение расхода воды в классифицирующий аппарат $\Delta W_{КЛ}$;
- догрузка измельчающей среды $\Delta \varphi_{Ш}^{догр}$;
- управление работой мельницы (аварийный останов, вывод в ремонт и т.п.) \bar{U}_M ;
- управление работой классифицирующим аппаратом (аварийный останов, вывод в ремонт, переход на дублирующее оборудование и т.п.) $\bar{U}_{КЛ}$.

Ниже показан технологический процесс измельчения – объект управления (рис. 2) [5].

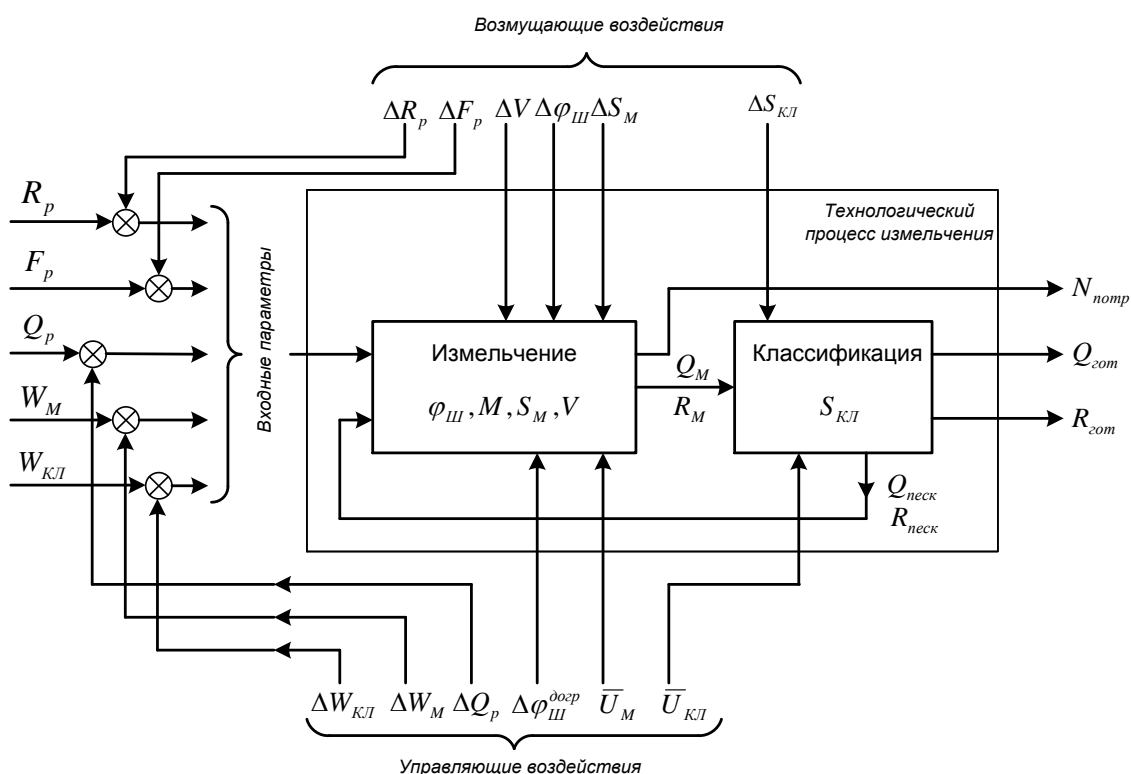


Рисунок 2. Технологический процесс измельчения – объект управления [5]

Оценка состояния процесса измельчения бадделейт-апатит-магнетитовых руд

Состояние процесса управления будем оценивать по трем технологическим параметрам [5, 7, 8, 9, 10, 11]:

$$X = \{q^{0.16}, K, \varphi_{Ш}\},$$

где: $q^{0.16}$ – удельная производительность мельницы (производительность единицы объема мельницы) по определяющему классу крупности (-0,16+0 мм), т/ч·м³;

K – коэффициент качества процесса измельчения;

$\varphi_{Ш}$ – объемное заполнение мельницы шарами, %.

Удельная производительность мельницы по определяющему классу крупности $q^{0.16}$, как характеризует измельчаемость материала и степень пульпового заполнения мельницы M ; ее максимальное значение $q_{\max}^{0.16}$ соответствует предельному внутримельничному наполнению.

$$q^{0.16} = \frac{Q^{0.16}}{V_M} \quad (1)$$

где: V_M – внутренний объем мельницы, м³;

$Q^{0.16}$ – производительность мельницы по определяющему классу крупности, т/ч.

Коэффициент качества процесса измельчения определяется по следующему выражению:

$$K = \frac{Q^{0.16}}{Q_p} \quad (2)$$

где Q_p – производительность мельницы по руде, т/ч.

Для оценки состояния процесса введем лингвистические переменные, определим их терм-множества и зададим функции принадлежности каждому терм-множеству лингвистической переменной.

Итак, имеем три лингвистические переменные:

- «удельная производительность по определяющему классу крупности»;
- «коэффициент качества процесса измельчения»;
- «объемное заполнение мельницы шарами».

Формализация данных лингвистических переменных представлена в таблицах 5, 6, 7 и на рисунках 3, 4, 5.

Таблица 5

Формализация лингвистической переменной «удельная производительность по определяющему классу крупности»

Область регламентного состояния	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[0; 2]	«Низкая»	[0; 1,3]	$1, \text{ при } 0 \leq q^{0.16} \leq 0.6$ $\frac{1}{1 + \exp(15 \cdot (q^{0.16} - 0.95))}, \text{ при } 0.6 < q^{0.16} \leq 1.3$
	«Средняя»	[0,6; 2]	$\frac{1}{1 + \exp(-15 \cdot (q^{0.16} - 0.95))}, \text{ при } 0.6 \leq q^{0.16} \leq 1.3$ $\frac{1}{1 + \exp(15 \cdot (q^{0.16} - 1.65))}, \text{ при } 1.3 < q^{0.16} \leq 2.0$
	«Высокая»	[1,3; 2]	$\frac{1}{1 + \exp(-15 \cdot (q^{0.16} - 1.65))}$

Таблица 6

Формализация лингвистической переменной «коэффициент качества процесса измельчения»

Область регламентного состояния	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[0,16; 0,28]	«Низкий»	[0,16; 0,20]	$\frac{1}{1 + \exp(300 \cdot (K - 0.18))}$
	«Пониженный»	[0,16; 0,24]	$\frac{1}{1 + \exp(-300 \cdot (K - 0.18))}$, при $0.16 \leq K \leq 0.20$
			$\frac{1}{1 + \exp(300 \cdot (K - 0.22))}$, при $0.20 < K \leq 0.24$
	«Средний»	[0,20; 0,28]	$\frac{1}{1 + \exp(-300 \cdot (K - 0.22))}$, при $0.20 \leq K \leq 0.24$
$\frac{1}{1 + \exp(300 \cdot (K - 0.26))}$, при $0.24 < K \leq 0.28$			
«Высокий»	[0,24; 0,28]	$\frac{1}{1 + \exp(-300 \cdot (K - 0.26))}$	

Таблица 7

Формализация лингвистической переменной «объемное заполнение мельницы шарами»

Область регламентного состояния	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[42; 52]	«Низкое»	[42; 46]	1, при $42 \leq \varphi_{ш} \leq 44$
			$\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\varphi_{ш} - 45))}$, при $44 < \varphi_{ш} \leq 46$
	«Пониженное»	[44; 48]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\varphi_{ш} - 45))}$, при $44 \leq \varphi_{ш} \leq 46$
			$\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\varphi_{ш} - 47))}$, при $46 < \varphi_{ш} \leq 48$
«Нормальное»	[46; 50]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\varphi_{ш} - 47))}$, при $46 \leq \varphi_{ш} \leq 48$	
		$\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\varphi_{ш} - 49))}$, при $48 < \varphi_{ш} \leq 50$	
«Высокое»	[48; 52]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\varphi_{ш} - 49))}$, при $48 \leq \varphi_{ш} \leq 50$	
			1, при $50 < \varphi_{ш} \leq 52$

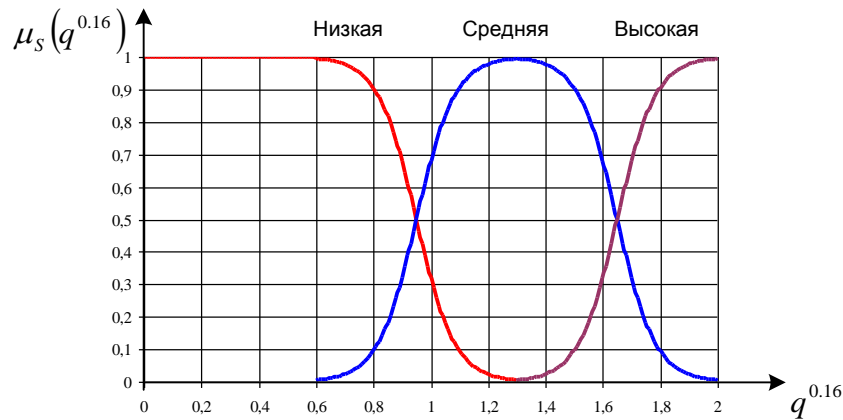


Рисунок 3. Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной удельная производительность по определяющему классу крупности [5]

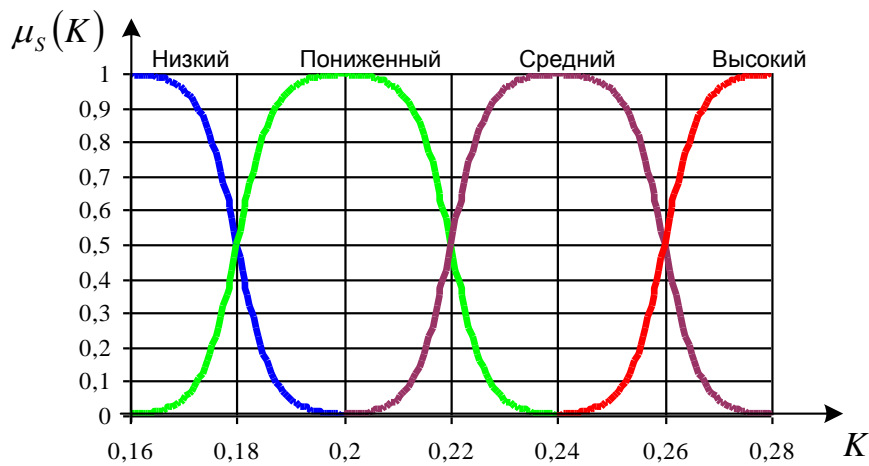


Рисунок 4. Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной коэффициент качества процесса измельчения [5]



Рисунок 5. Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной объемное заполнение мельницы шарами [5]

Определение центра технологической безопасности процесса измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд

Центром безопасности удельной производительности по определяющему классу крупности $q^{0.16}$ будет являться максимальная удельная производительность по определяющему классу $q_{\max}^{0.16}$, которая характеризует измельчаемость руды и определяется только ее свойствами. Исходя из этого, центр безопасности удельной производительности по определяющему классу будет зависеть от типа перерабатываемой руды (согласно технологической типизации) и от содержания бадделеита в руде, как одного из основных минералов, определяющего ее свойства.

По данным экспресс-минералогического анализа проводится классификация руды согласно технологической типизации.

По решающей таблице (табл. 8), составленной на основе знаний экспертов, делается нечеткий логический вывод. Таким образом, определяется значение нечеткой переменной «максимальная удельная производительность по определяющему классу»; приведение к четкости проводится центроидным методом. Полученная в результате максимальная удельная производительность и является центром технологической безопасности по данному параметру.

Таблица 8

Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной «максимальная удельная производительность по определяющему классу крупности»

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
T_1	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая	Низкая
T_2	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
T_3	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя
T_4	Средняя	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая

где: T_i – тип руды;

N_i – терм-множества лингвистической переменной «содержание бадделеита в руде».

Таким образом, при изменении свойств перерабатываемой руды происходит смещение центра технологической безопасности процесса. Блок-схема определения центра безопасности технологического параметра «удельной производительности по определяющему классу» представлена на рисунке 6.

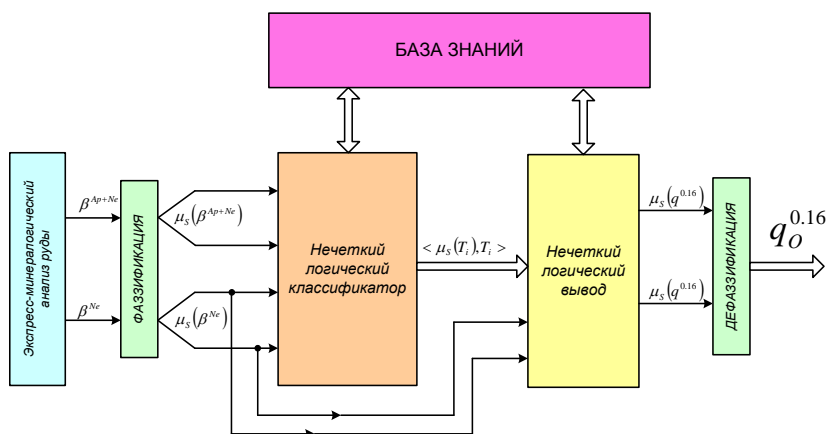


Рисунок 6. Блок-схема определения центра безопасности технологического параметра «удельная производительность по определяющему классу крупности» [5]

Расчет центра безопасности технологического параметра коэффициент качества процесса измельчения

Коэффициент качества процесса измельчения определяет требуемую крупность готового продукта измельчения. Необходимость помола руды до той или иной степени крупности определяется обогатимостью руды и заданной кондицией на концентрат $\beta_K^{+0.16}$. Показателем, характеризующим обогатимость руды, является технологическое извлечение ценного компонента в концентрат ε_{mex} , %. Рациональное технологическое извлечение ε_{mex} для данного типа бадделеит-апатит-магнетитовых руды (БАМР) зависит от содержания ценного компонента в руде ($\beta^{P_2O_5}$, %) и суммарного содержания апатита и бадделеита в руде (β^{Ap+Bad} , %).

Рациональное технологическое извлечение ценного компонента в концентрат будем находить, используя правила нечеткого логического вывода на основании базы знаний, сформированной по результатам экспертного опроса [4].

Первоначально введем лингвистические переменные: «суммарное содержание апатита и бадделеита в руде», «содержание ценного компонента в руде» и «технологическое извлечение», определим их терм-множества и зададим функции принадлежности каждому терм-множеству лингвистической переменной.

Формализация лингвистических переменных «содержание ценного компонента в руде» и «технологическое извлечение» представлена в таблицах 9, 10 и на рисунках 7, 8.

По значению нечеткой переменной «технологическое извлечение» и заданной ГОСТом кондиции на апатитовый концентрат $\beta_K^{+0.16} = 13,5\%$ согласно правилам нечеткого логического вывода определяется нечеткое значение переменной «коэффициент качества процесса измельчения»; приведение к четкости проводится центроидным методом.

Правила нечеткого логического вывода

1. Если «технологическое извлечение» – «низкое», тогда «коэффициент качества процесса измельчения» – «высокий».
2. Если «технологическое извлечение» – «среднее», тогда «коэффициент качества процесса измельчения» – «средний».
3. Если «технологическое извлечение» – «повышенное», тогда «коэффициент качества процесса измельчения» – «пониженный».
4. Если «технологическое извлечение» – «высокое», тогда «коэффициент качества процесса измельчения» – «высокий».

Блок-схема определения центра безопасности технологического параметра «коэффициент качества процесса измельчения» представлена на рисунке 9. Далее представлены формализация лингвистических переменных «содержание ценного компонента в руде» (табл. 9) и «технологическое извлечение» (табл. 10) [5].

Таблица 9

Формализация лингвистической переменной «содержание ценного компонента в руде» [5]

Область регламентного состояния	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[10; 18]	«Низкое»	[10; 13]	$1, \quad \text{при } 10 \leq \beta^{P_2O_5} \leq 11$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\beta^{P_2O_5} - 12))}, \quad \text{при } 11 < \beta^{P_2O_5} \leq 13$
	«Среднее»	[11; 15]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\beta^{P_2O_5} - 12))}, \quad \text{при } 11 \leq \beta^{P_2O_5} \leq 13$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\beta^{P_2O_5} - 14))}, \quad \text{при } 13 < \beta^{P_2O_5} \leq 15$
	«Повышенное»	[13; 17]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\beta^{P_2O_5} - 14))}, \quad \text{при } 13 \leq \beta^{P_2O_5} \leq 15$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\beta^{P_2O_5} - 16))}, \quad \text{при } 15 < \beta^{P_2O_5} \leq 17$
	«Высокое»	[15; 18]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\beta^{P_2O_5} - 16))}, \quad \text{при } 15 \leq \beta^{P_2O_5} \leq 17$ $1, \quad \text{при } 17 < \beta^{P_2O_5} \leq 18$

Таблица 10

Формализация лингвистической переменной «технологическое извлечение» [5]

Область регламентного состояния	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[88; 98]	«Низкое»	[88; 92]	$1, \quad \text{при } 88 \leq \varepsilon_{mex} \leq 90$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\varepsilon_{mex} - 91))}, \quad \text{при } 90 < \varepsilon_{mex} \leq 92$
	«Среднее»	[90; 94]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\varepsilon_{mex} - 91))}, \quad \text{при } 90 \leq \varepsilon_{mex} \leq 92$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\varepsilon_{mex} - 93))}, \quad \text{при } 92 < \varepsilon_{mex} \leq 94$
	«Повышенное»	[92; 96]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\varepsilon_{mex} - 93))}, \quad \text{при } 92 \leq \varepsilon_{mex} \leq 94$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\varepsilon_{mex} - 95))}, \quad \text{при } 94 < \varepsilon_{mex} \leq 96$
	«Высокое»	[94; 98]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\varepsilon_{mex} - 95))}, \quad \text{при } 94 \leq \varepsilon_{mex} \leq 96$ $1, \quad \text{при } 96 < \varepsilon_{mex} \leq 98$

Ниже представлены функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной по содержанию ценного компонента в руде (рис. 7) и технологическому извлечению (рис. 8) [5].

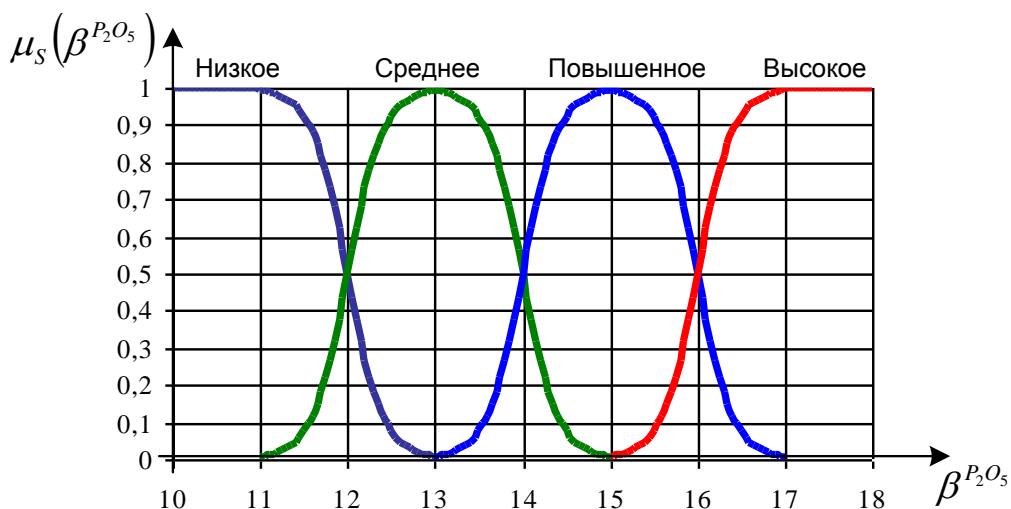


Рисунок 7. Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание ценного компонента в руде» [5]

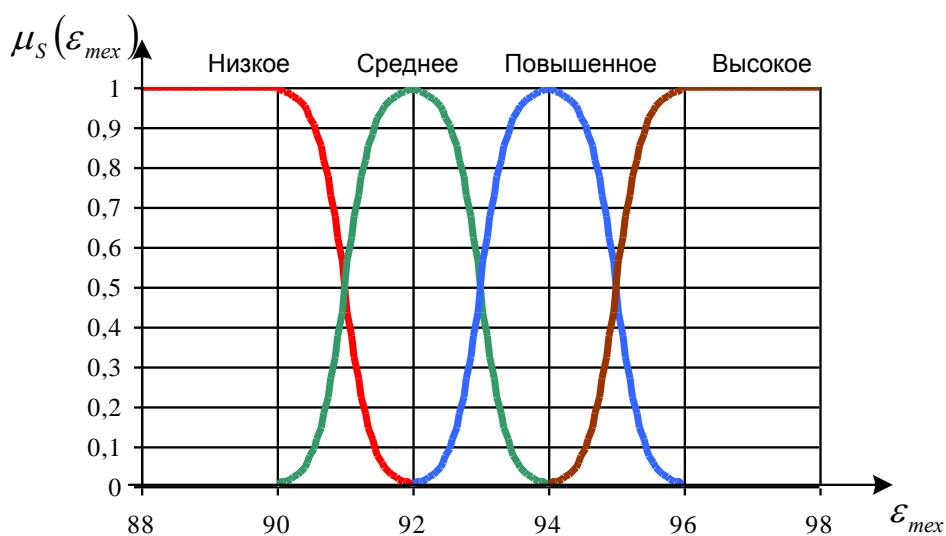


Рисунок 8. Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «технологическое извлечение» [5]

По решающей таблице (табл. 11), составленной на основе знаний экспертов, делается нечеткий логический вывод. Таким образом, определяется значение нечеткой переменной «технологическое извлечение» [5].

Таблица 11
Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной «технологическое извлечение» [5]

		Суммарное содержание апатита и бадделеита в руде					
		«Очень низкое»	«Низкое»	«Среднее»	«Повышенное»	«Высокое»	«Очень высокое»
Содержание ценного компонента в руде	«Низкое»	Низкое	Низкое	Низкое	Среднее	Среднее	Среднее
	«Среднее»	Низкое	Низкое	Среднее	Среднее	Среднее	Повышенное
	«Повышенное»	Низкое	Низкое	Среднее	Среднее	Повышенное	Высокое
	«Высокое»	Низкое	Среднее	Среднее	Среднее	Повышенное	Высокое

Ниже представлена блок-схема определения центра безопасности технологического параметра «коэффициент качества процесса измельчения» (рис. 9).

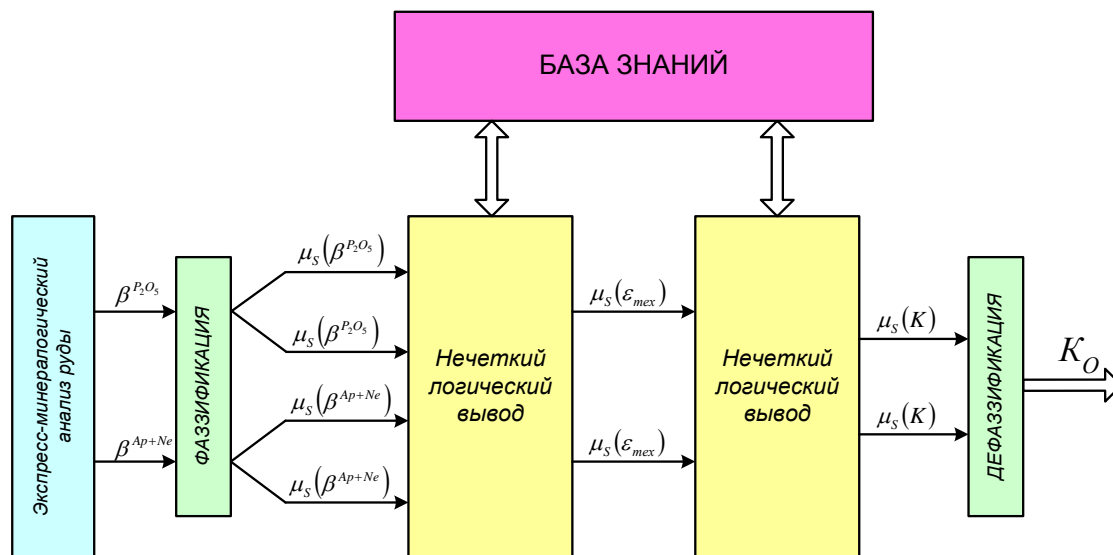


Рисунок 9. Блок-схема определения центра безопасности технологического параметра «коэффициент качества процесса измельчения» [5]

Расчет центра безопасности технологического параметра объемное заполнение мельницы шарами

Интервал изменения параметра в области регламентного состояния процесса – $\varphi_{III} \in [46;51], \%$. Разобьем данный интервал на множество непересекающихся диапазонов изменения объемного заполнения мельницы шарами следующим образом:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\} = \{(45;46), (46;47), (47;48), (48;49), (49;50), (50;51)\} \text{ (табл. 12)}$$

Зададим нечеткое отношение предпочтения xRy – «интервал x значений параметра $\varphi_{III} \in \Delta\varphi_{III}^{pezl}$ не хуже (с точки зрения безопасности функционирования технологического процесса) интервала y » в виде матрицы (таблица 12).

Матрица нечеткого отношения доминирования $R^D = R \setminus R^{-1}$ с функцией принадлежности $\mu_{R^D}(y, x) = \max\{\mu_R(y, x) - \mu_R(x, y), 0\}$ представлена в таблице 13.

Таблица 12

Отношение предпочтения на множестве интервалов параметра «объемное заполнение мельницы шарами» [5]

Интервал	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
y_1	1,0	0,2	0	0,1	0,5	0,7
y_2	0,6	1,0	0,2	0,1	0,6	0,8
y_3	1,0	0,7	1,0	0,8	0,9	1,0
y_4	0,5	0,4	0,2	1,0	0,1	0
y_5	0,6	0,5	0,1	0,7	1,0	0,3
y_6	0,7	0,3	0,1	0,9	0,7	0,1

Таблица 13

Отношение доминирования на множестве интервалов параметра «объемное заполнение мельницы шарами» [5]

Интервал	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
y_1	0	0	0	0	0	0
y_2	0,4	0	0	0	0	0,1
y_3	1,0	0,5	0	0,6	0,7	0,9
y_4	0,4	0,3	0	0	0	0
y_5	0,1	0	0	0,6	0	0
y_6	0	0	0	0,9	0,4	0

Определим нечеткое подмножество недоминируемых альтернатив согласно выражению $\mu_R^{n.o.}(y) = 1 - \max_{x \in Y} \{\mu_{R^D}(y, x)\}$ (табл. 14).

Таблица 14

Множество недоминируемых альтернатив интервалов параметра «объемное заполнение мельницы шарами» [5]

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
0	0,5	1,0	0,1	0,3	0,1

Определим максимально недоминируемые альтернативы модели выбора $(Y, R(\mu_R))$.

$$Y^{n.o.} = \{y / y \in Y, \mu_R^{n.o.} = \sup \mu_R^{n.o.}(z), z \in Y\} = \{y_3\}$$

Выделив из полученного нечеткого множества $Y_R^{n.d.}$ интервал, имеющий максимальную степень недоминируемости, получаем интервал y_O^i , который является наиболее предпочтительным для данного технологического параметра с точки зрения безопасности.

Таким образом, областью технологической безопасности параметра «объемное заполнение мельницы шарами» будет являться интервал $y_3 \equiv [47;48]$, % (рис. 10).

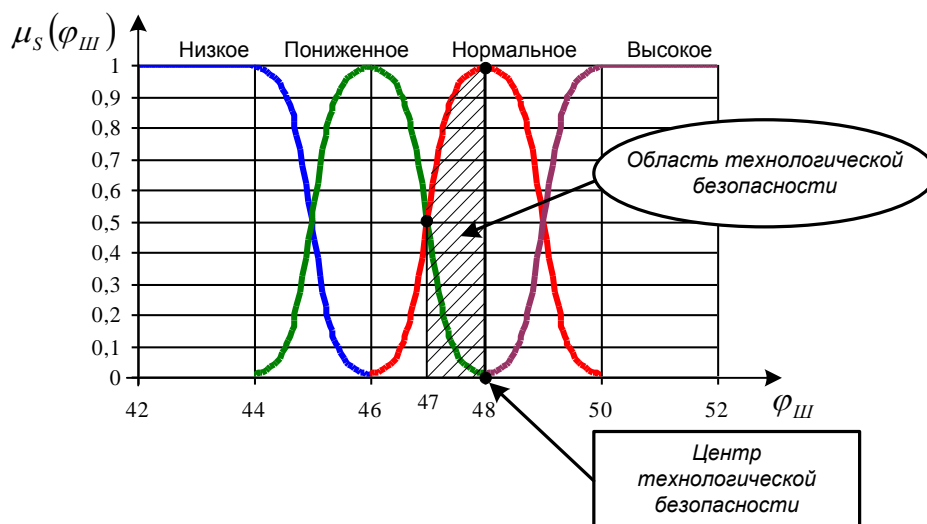


Рисунок 10. Центр технологической безопасности параметра «объемное заполнение мельницы шарами» [5]

Значение параметра $\varphi_{Ш}^O$ из интервала $y_3 \equiv [47;48]$, соответствующего области технологической безопасности процесса, для которого $\mu_{E_i}(\varphi_{Ш}^O) = \max_{\varphi_{Ш} \in y_3} \mu_{E_i}(\varphi_{Ш})$ определит центр технологической безопасности параметра «объемное заполнение мельницы шарами» (см. рис. 10).

Таким образом

$$\varphi_{Ш}^O = 48 \% .$$

Алгоритм управления технологическим процессом измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд

Алгоритм управления технологическим процессом измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд представлен в виде блок-схемы на рисунке 11 [5].

По показаниям технологических датчиков (датчик производительности пульпового насоса, датчик крупности исходной руды) и данным экспресс-минералогического анализа руды модель объекта управления прогнозирует гранулометрический состав готового продукта измельчения. По результатам прогноза модели объекта управления вычисляются удельная производительность агрегата по определяющему классу крупности $q^{0.16}$, коэффициент качества процесса измельчения K и состояние шаровой загрузки мельницы $\varphi_{Ш}$. Данные технологические параметры поступают в блок оценки текущего состояния процесса (БОС).

В блоке оценки состояния проводится фазсификация входных переменных, т.е. приведение к нечеткости. Для этих целей по результатам экспертного опроса определяются

терм-множества и функции принадлежности термам каждого технологического параметра. Текущая ситуация определяется множеством нечетких значений технологических параметров. Результат оценки текущей ситуации передается в блок принятия решения по управлению процессом (БПР).

Для выбора оптимального с точки зрения технологической безопасности вектора управления необходимо сформировать множество альтернативных управляющих решений.

Вектор управления рассматриваемым процессом определяется тремя координатами:

- производительность пульпового насоса по количеству подаваемой пульпы Q_p ;
- расход воды в классифицирующий аппарат $W_{кл}$;
- догрузка шаров в мельницу $\varphi_{III}^{догр}$.

Рекомендуемые значения приращений:

- а) производительность магистрального пульпового насоса по количеству подаваемой пульпы – $\delta Q_p = 2$, т/ч;
- б) расход воды в классифицирующий аппарат – $\delta W_{кл} = 10$, м³/ч;
- в) догрузка шаров в мельницу – $\delta \varphi_{III}^{догр} = 2$, т.

После получения множества альтернативных управляющих решений проводится композиция текущей ситуации с каждой альтернативой с использованием модели объекта управления.

Модель объекта управления прогнозирует новые значения переменных состояния процесса, полученные для каждого альтернативного управления. Таким образом, формируется множество альтернативных ситуаций X_A .

Для каждой альтернативной ситуации \tilde{s}_i определяется индекс технологической безопасности $In(\tilde{s}_i)$, т.е. определяется степень нечеткого равенства между альтернативной ситуацией и ситуацией, соответствующей центру технологической безопасности \tilde{s}_0 .

В блоке оценки центра технологической безопасности (БОЦТБ) определяются значения каждой из координат центра. В зависимости от изменения свойств перерабатываемой руды происходит смещение центра технологической безопасности процесса (ЦТБ). Таким образом, достигается адаптация системы ситуационного управления технологическим процессом измельчения.

Наиболее рациональной из множества альтернатив будет являться ситуация, имеющая максимальный индекс безопасности. Далее проводятся две проверки.

Первая проверка. Если максимальный индекс безопасности соответствует текущей ситуации, т.е. любое альтернативное решение не приводит к улучшению ситуации, тогда вектор управления остается без изменения. Если это не так, проводится вторая проверка.

Вторая проверка. Если максимальный индекс безопасности альтернативной ситуации \tilde{s}_k больше некоторого значения b , называемого границей области технологической безопасности, то значение вектора управления $\bar{u}_{опт} = \bar{u}_k$, который приводит к ситуации \tilde{s}_k , является оптимальным. Если условие второй проверки не выполняется, тогда вектору

управления присваивается значение $\bar{u} := \bar{u}_k$ и строится новое множество альтернативных управляющих решений.

Процесс принятия управляющего решения является итеративным и заканчивается в результате выполнения одного из условий проверки.

На рисунке 12 представлена функциональная схема адаптивной системы ситуационного управления технологическим процессом измельчения.

На схеме приняты следующие обозначения:

G – датчик производительности пульпового насоса;

R_1 – датчик гранулометрического состава исходной пульпы;

R_2 – датчик гранулометрического состава готового продукта измельчения;

R_3 – датчик гранулометрического состава слива мельницы;

W – расходомер чистой воды.

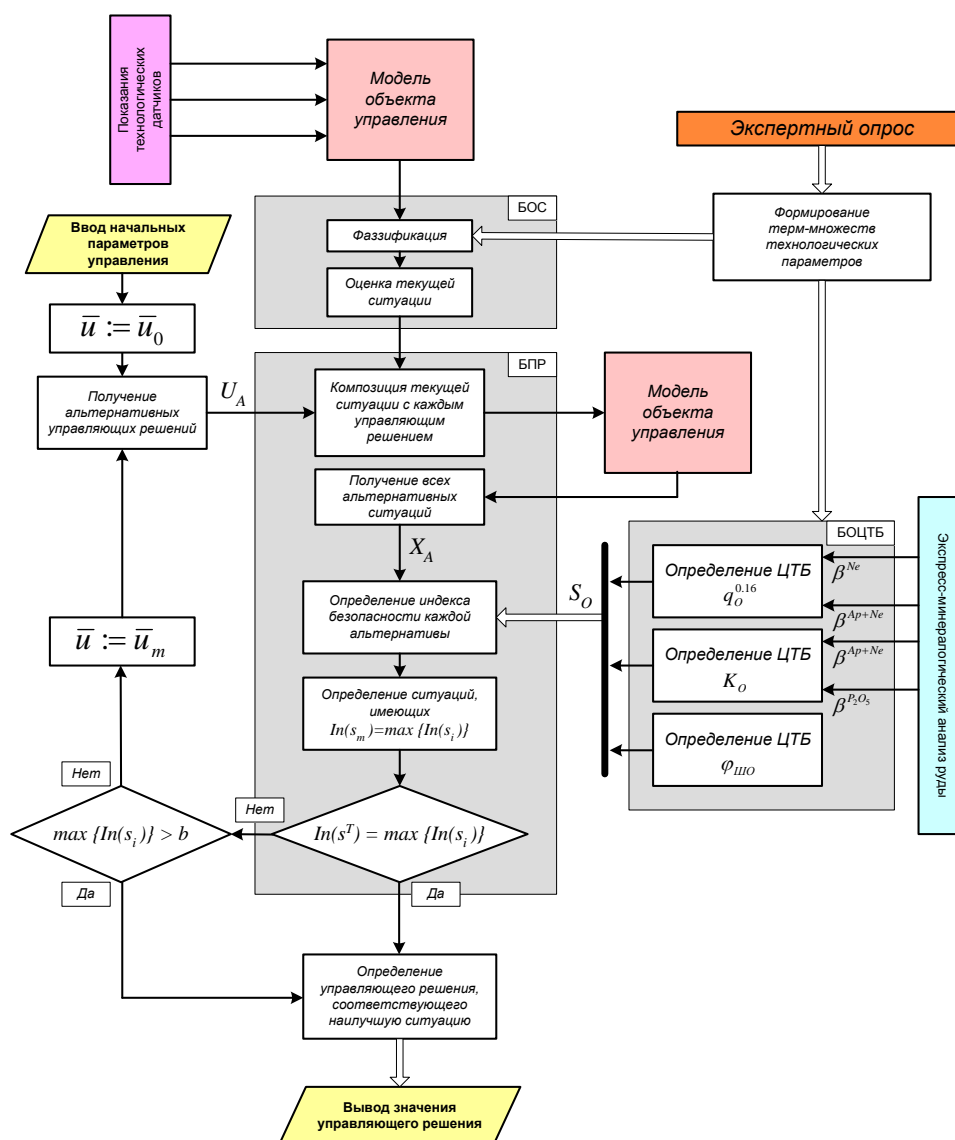


Рисунок 11. Блок-схема алгоритма управления технологическим процессом измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд (БАМР) [5]

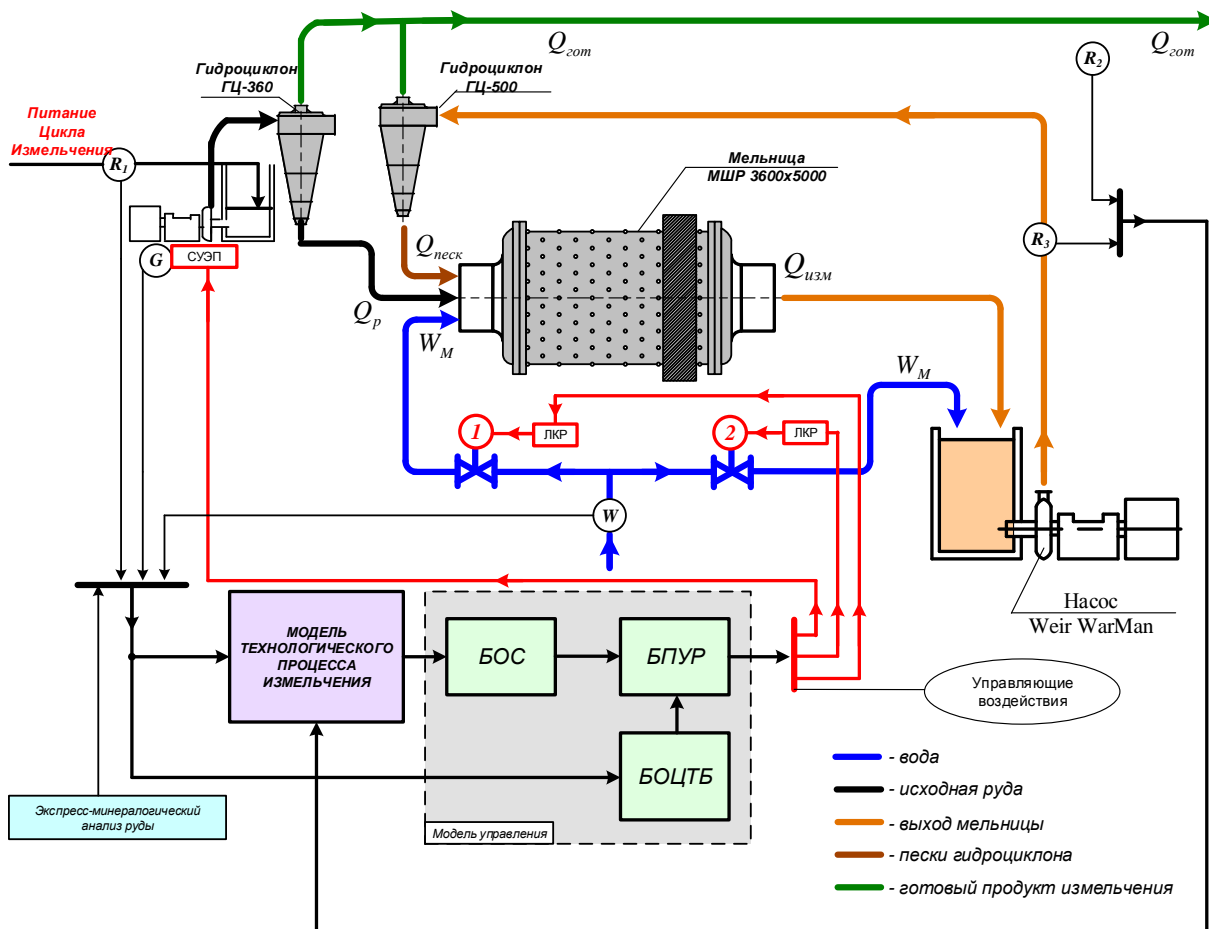


Рисунок 12. Функциональная схема адаптивной системы ситуационного управления[5]

По измеренным входным параметрам модель технологического процесса измельчения прогнозирует крупность готового продукта измельчения. Модель управления процессом формирует оптимальный с точки зрения технологической безопасности вектор управления. Координаты данного вектора являются уставками задания в локальных контурах регулирования (ЛКР) соответствующих управляющих параметров процесса.

ЛКР-1 – локальный контур регулирования подачи воды в мельницу.

ЛКР-2 – локальный контур регулирования подачи воды в классификатор.

СУЭП – система управления электроприводом пульпового насоса.

Выводы

На основании данных, накопленных в процессе работы апатито-бадделеитовой обогатительной фабрики, можно сделать вывод о том, что данный алгоритм с достаточной степенью точности позволяет автоматически корректировать уставки задания в контурах регулирования САР процесса измельчения в зависимости от изменения физико-механических свойств перерабатываемых хвостов железорудного производства, с целью извлечения максимального количества товарного апатитового и бадделеитового концентрата.

Внедрение данного алгоритма позволит своевременно реагировать на изменение максимальной удельной производительности мельниц, тем самым поддерживать производительность на максимально возможном уровне.

Таким образом, внедрение данного алгоритма приведет к увеличению производительности мельниц, экономии электроэнергии и к увеличению межремонтного пробега оборудования за счет постоянного оптимального режима работы агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Бармин ИС, Автореферат, к.т.н. 2011 г. Повышение эффективности флотации апатита из тонкозернистой части техногенного месторождения на основе применения оксиэтилированных моноалкилфенолов.
3. Златорунская Г.Е. Оценка измельчаемости дробленой руды по ее гранулометрической характеристике. Обогащение руд, №2, 1985 г.
4. Златорунская Г.Е., Бойко А.Ю., Голованов В.Г. и др. Оптимизация процессов рудоподготовки и обогащения руд различного минералогического состава. Научно-технический прогресс в ПО «АПАТИТ», ч. II, М., 1989 г., 186 стр.
5. Кулаков А.Г. Ситуационное управление технологической безопасностью процесса измельчения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук М., 2008.
6. Туз А.А., Богатиков В.Н., Шпрехер Д.М. Нечеткая модель ресурсного обеспечения технологической безопасности процесса подготовки питания флотации ОАО "Ковдорский ГОК". Фундаментальные проблемы системной безопасности: Материалы V Международной научной конференции. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2014. С. 291-296.
7. Палюх Б.В., Богатиков В.Н., Пророков А.Е., Алексеев В.А. Приложение метода разделения состояний для управления технологической безопасностью промышленных процессов на основе нечетко определенных моделей. Монография. Тверь. 2009.
8. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М.: "Химия", 1974. 345 с.
9. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: М., Недра, 1981, 243 с.
10. Марюта А.Н., Качан Ю.Г., Бунько В.А. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. М., «Недра», 1983 г., 277 стр.
11. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986. - 396 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

Kulakov Andrey Gennadyevich

Joint Stock Company «Apatit», Russia, Apatity
AGKulakov1968@yandex.ru

The automatic control system of unit of wet grinding with a closed cycle based on fuzzy-logic models

Abstract. The article describes the technology of grinding in the apatite-baddeleyite concentrator. The technical characteristics of the equipment used. We consider the process of grinding as a control object. We give state variables that characterize the process of classification. Showing input and output parameters of the control object. Produced assessment process grinding baddeleyite-apatite-magnetite ores. We give a formalization of linguistic variables according to various criteria. Determination of process safety center grinding process. Formation of the membership function of the linguistic term set variable according to various criteria. The calculation of the security center on the various process parameters. The algorithm of process control grinding baddeleyite-apatite-magnetite ores. Formed a flowchart of process control of grinding baddeleyite-apatite-magnetite ores. It is a functional diagram of an adaptive system of situational management.

Keywords: baddeleyite-apatite-magnetite ores; apatite; baddeleyite concentrate; mineral processing; food preparation flotation; apatite flotation; "Kovdorsky mining-and-processing plant"; System evaluation of model parameters; kinetics; mixing; grinding; mill; hydrocyclone; technological security center; fuzzy logic.

REFERENCES

1. Bocharov S.N., Kuznetsov V.S., Shenderovich E.M., Kuz'min K.B. Tekhnologicheskiy kompleks pererabotki peskov tekhnogennoy mestorozhdeniya // Gornyy zhurnal. 2007. №9. S. 56-58.
2. Barmin IS, Avtoreferat, k.t.n. 2011 g. Povyshenie effektivnosti flotatsii apatita iz tonkozernistoy chasti tekhnogennoy mestorozhdeniya na osnove primeneniya oksietilirovannykh monoalkilfenolov.
3. Zlatorunskaya G.E. Otsenka izmel'chaemosti droblenoy rudy po ee granulometricheskoy kharakteristike. Obogashchenie rud, №2, 1985 g.
4. Zlatorunskaya G.E., Boyko A.Yu., Golovanov V.G. i dr. Optimizatsiya protsessov rudopodgotovki i obogashcheniya rud razlichnogo mineralogicheskogo sostava. Nauchno-tekhnicheskii progress v PO «APATIT», ch. II, M., 1989 g., 186 str.
5. Kulakov A.G. Situatsionnoe upravlenie tekhnologicheskoy bezopasnost'yu protsessa izmel'cheniya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk M., 2008.
6. Tuz A.A., Bogatikov V.N., Shprekher D.M. Nechetkaya model' resursnogo obespecheniya tekhnologicheskoy bezopasnosti protsessa podgotovki pitaniya flotatsii OAO "Kovdorskiy GOK". Fundamental'nye problemy sistemnoy bezopasnosti: Materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Elets: EGU im. I.A. Bunina, 2014. S. 291-296.
7. Palyukh B.V., Bogatikov V.N., Prorokov A.E., Alekseev V.A. Prilozhenie metoda razdeleniya sostoyaniy dlya upravleniya tekhnologicheskoy bezopasnost'yu promyshlennykh protsessov na osnove nechetko opredlennykh modeley. Monografiya. Tver'. 2009.
8. Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P. Printsipy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem. M.: "Khimiya", 1974. 345 s.
9. Linch A.Dzh. Tsikly drobleniya i izmel'cheniya. Modelirovanie, optimizatsiya, proektirovanie i upravlenie: M., Nedra, 1981, 243 s.
10. Maryuta A.N., Kachan Yu.G., Bun'ko V.A. Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabrik. M., «Nedra», 1983 g., 277 str.
11. Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta / Pod red. D.A. Pospelova. - M.: Nauka, 1986. - 396 s.