

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

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

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN216.pdf>

DOI: 10.15862/92TVN216 (<http://dx.doi.org/10.15862/92TVN216>)

Статья опубликована 19.04.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н. Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/92TVN216

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

Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации

Аннотация. В статье формулируются основная цель автоматизации управления технологическими процессами. Приведены функциональные зависимости для максимальной производительности обогатительной фабрики. Показаны факторы, влияющие на процесс обогащения руд. Даются основные направления по решению задач повышения производительности обогатительной фабрики по готовому продукту. Проведено исследование

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

факторов, определяющих производительность агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом. Приводится влияние минералогического состава руды на производительность агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом. Оценка технологической эффективности работы передела измельчения. Показано, что снижение разрыва между максимальной и фактической удельными производительностями мельницы является основной задачей оптимизации процесса измельчения. Рассматривается оптимальное пульповое наполнение мельниц. Эффективность работы классифицирующих аппаратов. Роль расхода воды в мельницу.

Ключевые слова: бадделеит-апатит-магнетитовые руды; апатит; бадделеитовый концентрат; обогащение полезных ископаемых; подготовка питания флотации; апатитовая флотация; "Ковдорский горно-обогатительный комбинат"; минералогический состав руд; производительность мельницы; исследование процесса измельчения; кинетика; смешение; измельчение

Обобщенная постановка задачи

Основную цель автоматизации управления технологическими процессами, в общем, для любой обогатительной фабрики 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 [1, 2].

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

Применительно к апатито-бадделеитовой обогатительной фабрике (АБОФ) Ковдорского горно-обогатительного комбината 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 бадделеита в исходной руде $\beta_p^{\Sigma Ap+Bad}$ и от технологического извлечения полезного компонента (P_2O_5) в концентрат ε в процессе обогащения (флотации):

$$\beta_k^{P_2O_5} = f(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad}, \varepsilon) \quad (1)$$

Содержание класса +0,16 мм в концентрате $\beta_k^{+0,16}$ является функцией от технологического извлечения ε и содержания класса +0,16 мм в сливе классифицирующих аппаратов измельчительных установок $\beta_{слив}^{+0,16}$:

$$\beta_k^{+0,16} = f(\varepsilon, \beta_{слив}^{+0,16}) \quad (2)$$

Максимальная производительность обогатительной фабрики по апатитовому концентрату Q_k , соответствующая основной цели автоматизации, представляет функциональную зависимость вида:

$$Q_k = f(Q_p, \varepsilon, \beta_p^{P_2O_5}) \quad (3)$$

Где:

Q_p – количество перерабатываемой руды, т/ед. времени;

$\beta_p^{P_2O_5}$ – содержание P_2O_5 в руде, %.

В свою очередь Q_p зависит от производительности мельниц – одного из дорогостоящего и самого энергоемкого оборудования на обогатительной фабрике.

$$Q_p = f(Q_{мел}) = f(\beta_{слив}^{+0,16}, \beta_p^{Bad}, q_{0,16}, \beta_p^{-0,16}, \phi_{ш}, V, S_{кл}) \quad (4)$$

Где:

$Q_{мел}$ – производительность мельниц, т/ч;

β_p^{Bad} – содержание бадделеита в руде, %;

$q_{0,16}$ – удельная производительность мельниц по вновь образованному готовому продукту -0,16+0 мм.

Максимальная удельная производительность мельниц по вновь образованному готовому продукту ($q_{0,16}^{max}$) характеризует измельчаемость руды.

Фактическая удельная производительность мельниц $q_{0,16}^{факт}$ 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.

$$q_{0,16}^{max} = f(\beta_p^{Bad}) \quad (5)$$

Где:

$\beta_{слив}^{+0,16}$ – содержание класса +0,16 мм в измельченном продукте, %;

$\beta_p^{-0,16}$ – содержание готового продукта -0,16+0 мм в дробленой руде, %;

$\phi_{ш}$ – шаровое наполнение мельницы, %;

$S_{кл}$ – состояние классифицирующего оборудования;

V – объем мельницы, м³.

Объем мельницы V зависит от состояния защитной футеровки мельниц.

Возвращаясь к формуле (4) и принимая количество, тип обогатительного оборудования, уровень управления процессом обогащения и ряд других параметров постоянными, извлечение P_2O_5 в концентрат определяется как:

$$\varepsilon = f(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad}, \beta_k^{P_2O_5}, c, t_n^\circ, R, R', S_{фл}) \quad (6)$$

Где:

c – характеристика оборотной воды;

t_n° – температура флотационной пульпы;

R – состав и расход реагентов;

R' – способ обработки пульпы реагентами;

$S_{фл}$ – состояние флотационного оборудования.

Подставляя (4), (6), (7) и (9) в выражение (3) получим функциональную зависимость объема выработки апатитового концентрата от основных факторов, определяющих показатели процесса обогащения:

$$Q_k = f \left[\begin{array}{l} (\beta_p^{p_2O_5}, \beta_p^{\Sigma Ap+Bad}, \beta_p^{Bad}), \\ (a_I, a_{II}, a_{III}, i_I, i_{II}, i_{III}, K), \\ (\beta_{слив}^{+0,16}, q_{0,16}, \varphi_{III}, V, S_{KЛ}), \\ (\beta_k^{p_2O_5}, c, t_n^\circ, R, R', S_{\PhiЛ}) \end{array} \right]$$

Факторы, влияющие на процесс обогащения руд.

I группа факторов – минеральный состав руды;

II группа факторов – параметры дробильного оборудования, определяющие степень сокращения крупности дробленой руды;

III группа факторов – параметры, определяющие показатели процесса измельчения;

IV группа факторов – параметры, определяющие процесс флотации.

Таким образом, можно выделить три основных направления по решению задач повышения производительности обогатительной фабрики по готовому продукту [3, 4]:

- 1) Технологический путь решения проблемы, который заключается в разработке эффективных регламентных условий ведения процесса и в совершенствовании технологического оборудования;
- 2) Создание более гибких автоматизированных систем управления процессами рудоподготовки, учитывающими технологические свойства поступающей в переработку руды (дробимость, измельчаемость и обогатимость);
- 3) Создание системы автоматического управления технологической безопасностью процессов рудоподготовки, включающей в себя систему автоматической диагностики установленного оборудования, систему автоматического управления критическими режимами технологических процессов, а также экспертную систему поддержки принятия решений.

Исследование факторов, определяющих производительность агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом

Производительность агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом определяется многими факторами.

Первая группа образуется факторами, зависящими от измельчаемого материала:

- содержание класса -0,16 мм в мелкодробленной руде $\beta_p^{-0,16}$ (то, что измельчать не надо), %;
- содержание класса +0,16 мм в готовом продукте измельчения $\beta_{слив}^{+0,16}$ (ограничение на крупность), %;
- измельчаемость руды;
- максимальная удельная производительность агрегата мокрого измельчения по определяющему классу крупности -0,16 мм $q_{0,16}^{\max}$, т/м³·ч.

Вторая группа факторов – проектно-конструкторские:

- конструкция и размеры мельницы;
- тип и конструкция классифицирующего аппарата;
- форма и материал футеровки мельницы.

Третья группа факторов – эксплуатационно-технологические:

- пульповое наполнение (запас материала) мельницы;
- разжижение пульпы в мельнице;

- эффективность работы классифицирующего аппарата;
- степень заполнения мельницы дробящей средой φ_{III} ;
- характеристика крупности, форма, плотность и твердость дробящихся тел.

Влияние минералогического состава руды на производительность агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом

При заданном значении крупности хвостов железного производства магнито-обогажительной фабрики (МОФ) по классу до +3 мм изменение содержания класса -0,16+0 мм ($\beta_p^{-0,16}$) зависит от содержания бадделеита и других минералов в руде, характеризуя измельчаемость руды.

При заданном значении крупности измельченной на МОФ руды по классу +3 мм изменение содержания класса -0,16+0 мм ($\beta_p^{-0,16}$) зависит от содержания бадделеита в руде, характеризуя дробимость руды.

$$\beta_p^{-0,16} = f(\beta_p^{+3}, \beta_p^{Bad}) \quad (7)$$

Где:

β_p^{+3} – содержание класса +3 мм в поступающих хвостах МОФ (%), зависит от эффективности обогажительных процессов на стадии железорудного производства;

β_p^{Bad} – содержание бадделеита в руде.

С модернизацией автоматизированной системы отбора и доставки на экспресс-анализ пульповых проб «Контур» возможно оценить содержание класса -0,16 мм в мелкодробленной руде $\beta_p^{-0,16}$ [5, 6].

Текущее содержание класса +0,16 мм в готовом продукте измельчения $\beta_{слив}^{+0,16}$ можно косвенно измерить по показаниям плотномера (% твердого на сливе классифицирующего аппарата).

Для заданного содержания класса +0,16 мм в концентрате $\beta_k^{+0,16}$ и по найденному технологическому извлечению ценного компонента ε можно оценить необходимое содержание класса +0,16 мм в готовом продукте измельчения $\beta_{слив}^{+0,16}$. Технологическое извлечение ценного компонента ε можно определить согласно технологической типизации бадделеит-апатит-магнетитовых руд.

Под измельчаемостью материала понимается его способность с большей или меньшей степенью легкости, превращаться при измельчении от определенной исходной крупности в продукт заданной крупности. Измельчаемость руды зависит от ее минералогического состава и от физико-механических свойств минералов.

Оценкой технологической эффективности работы передела измельчения является удельная производительность мельницы по вновь образованному готовому продукту -0,16+0 мм ($q_{0,16}$, т/м³·ч);

Предельную степень загрузки мельницы определяет максимальная удельная производительность $q_{0,16}^{\max}$ при оптимальном шаровом и пульповом заполнении, регламентном состоянии оборудования [7, 8].

При изменении минерального состава руды $q_{0,16}^{\max}$ не остается постоянной: с увеличением содержания бадделеита (*Bad*) в руде $q_{0,16}^{\max}$ уменьшается, характеризуя измельчаемость руды (рис. 1) [9, 10].

$$q_{0.16}^{\max} = f(\beta_p^{Bad}) \quad (8)$$

Снижение разрыва между максимальной $q_{0.16}^{\max}$ и фактической $q_{0.16}^{\text{факт}}$ удельными производительностями мельницы является основной задачей оптимизации процесса измельчения.

Установлено, что увеличение $q_{0.16}^{\text{факт}}$ на $0,1 \text{ т/м}^3 \cdot \text{ч}$ приводит к увеличению производительности мельниц на $4 \div 5\%$. На рисунке 1 показана зависимость между максимальной удельной производительностью мельниц $q_{0.16}^{\max}$ и содержанием бадделеита в руде β_p^{Bad} при оптимальном шаровом и пульповом наполнении мельницы и регламентном состоянии оборудования [11].

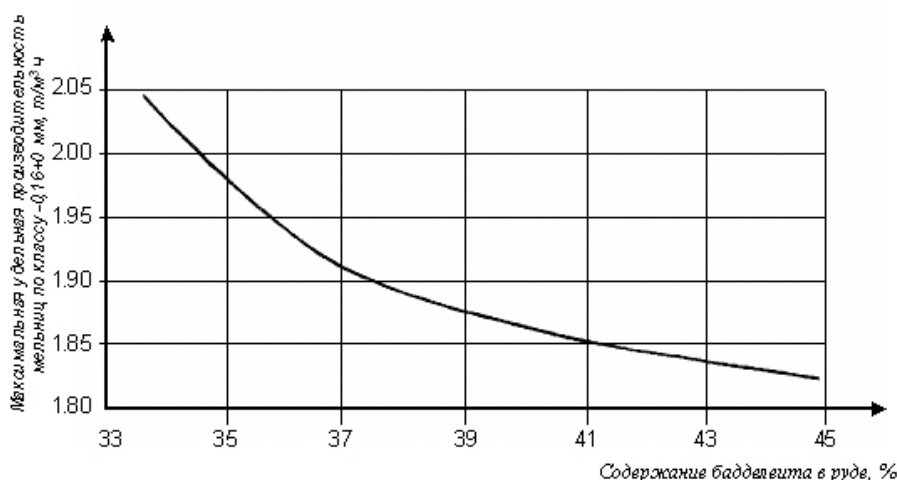


Рисунок 1. Зависимость между максимальной удельной производительностью мельниц $q_{0.16}^{\max}$ и содержанием бадделеита в руде β_p^{Bad} при оптимальном шаровом и пульповом наполнении мельницы и регламентном состоянии оборудования [11]

Оптимальное пульповое наполнение мельниц

Оптимальный режим работы агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом, при котором производительность стремится к своему максимальному значению, возможен при оптимальном пульповом наполнении мельницы. Пульповое наполнение мельницы (запас материала в мельнице) косвенно характеризуется уровнем шума S зоны помола, производимым при работе агрегата (в случае если данный способ измерения производительности агрегата используется).

Зависимость производительности мельницы от уровня шума носит экстремальный характер. Мельница достигает своей максимальной производительности при стремлении уровня шума к своему критическому значению:

$$Q_M = \max \quad \text{при} \quad S \rightarrow S_{\text{крит}}$$

Особенностью измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд в цикле подготовки питания апатитовой флотации до крупности $70 \div 85\%$ класса $-0,16+0$ мм является характер распределения удельных производительностей по классам $d-0$ мм в режимах приближения к предельному (например, при равной крупности измельчения) и в режимах с различной крупностью измельчения на одном значении шума зоны помола.

В результате исследований, проводимых производственными лабораториями различных горно-обогатительных предприятий установлено[5]:

- при пропорциональном изменении параметра шума зоны помола S пропорционально изменяются удельные производительности по всем классам крупности;
- по мере загрузки замкнутого цикла $S \rightarrow S_{крит}$ производительности растут по всем классам крупности и достигают максимального значения в предельных режимах $S = S_{крит}$, при оптимальном внутримельничном пульповом наполнении;
- кривые распределения удельных производительностей по вновь образованному продукту $d-0$ мм в режимах с различной крупностью измельчения на одном уровне загрузки мельниц $S = const$ (в том числе и $S = S_{крит}$) пересекаются и имеют общие точки, соответствующие классу крупности $-0,2+0,16$ мм, т.е. образуется «пучок», каждая кривая которого соответствует режиму работы мельницы на определенной крупности измельчения (рис. 2) [11].

Всё это дает основание заменить параметр шума S (пульповое наполнение) на технологический показатель – удельную производительность измельчительного агрегата по классу $+0,16$ мм.

Таким образом, удельная производительность мельницы по классу $-0,16+0$ мм ($q_{0.16}$) характеризует степень пульпового заполнения мельницы (ее максимальное значение совпадает с оптимальным внутримельничным заполнением) и степень измельчения.

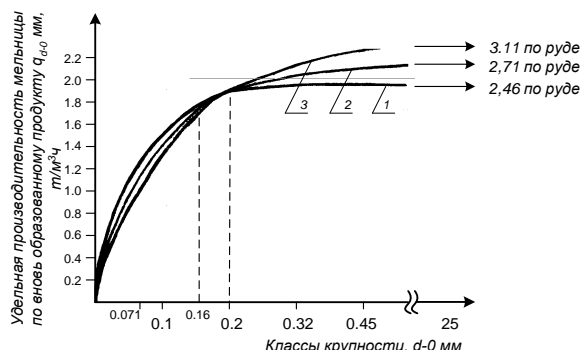


Рисунок 2. Распределение удельных производительностей мельниц по классам $d-0$ мм (по вновь образованному продукту) [11]

- 1 – крупность измельчения 13,9% класса $+0,16$ мм
- 2 – крупность измельчения 21,5% класса $+0,16$ мм
- 3 – крупность измельчения 30,0% класса $+0,16$ мм

Из всего выше сказанного можно сделать вывод: согласно технологической типизации бадделеит-апатит-магнетитовых руд и по данным экспресс-минералогического анализа для данного типа руды можно определить максимальную удельную производительность по определяющему классу $+0,16$ мм ($q_{0.16}^{max}$), а, следовательно, и критическое значение уровня шума ($S_{крит}$) необходимое для уставки задания уровня шума в контуре регулирования пульпового наполнения мельницы (в случае если данный контур используется).

Роль расхода воды в мельницу

Скорость прохождения материала через мельницу определяет заполнение мельницы пульпой относительно шарового наполнения и создает условия для работы шаров. А также, скорость прохождения материала определяет производительность мельницы по вновь образованной поверхности ($q_{0.16}$) при различной крупности измельчения и зависит от количества крупных и мелких классов в питании мельницы и от объема воды W_M , поступающей в мельницу.

Пределный режим измельчения ($S_{крит}, q_{0.16}^{max}$) считается оптимальным, когда плотность разгрузки мельницы и расход воды в мельницу оптимальны.

Оптимальную плотность разгрузки мельницы определяет степень приближения работы мельницы к границе устойчивости – это 80% твердого; а перегруз мельницы идет при 82÷83% твердого.

В исследованиях, проводимых производственными лабораториями различных горно-обогатительных предприятий установлено что расход воды в мельницу должен быть пропорциональным расходу руды и составлять [4]:

$$W_M = (0.25 \div 0.28) \cdot Q_M \quad (9)$$

Это количество воды необходимо чтобы довести % твердого самой руды до 79÷80% вместо 97%.

Эффективность работы классифицирующих аппаратов

Параметры классифицирующего оборудования подбираются таким образом, чтобы обеспечивать постоянство плотности песков при необходимых пределах регулирования.

Размер песковых насадок подбирается под предельные режимы работы мельницы.

В процессе работы гидроциклона размеры песковой и сливной насадок изменяются в результате абразивного износа. При хорошей системе диагностирования процесса измельчения и системе диагностики установленного оборудования можно отследить возникновение таких дефектов и своевременно принимать решение о переходе на дублирующее классифицирующее оборудование или о проведении ремонтно-восстановительных работ.

Оптимальное шаровое наполнение мельниц

Известно, что шаровое наполнение мельниц определяет эффективность работы мельницы по вновь образованной поверхности – $q_{0.16}^{max}$, т.е. производительность мельницы по руде при заданной крупности измельчения. Эта зависимость носит экстремальный характер.

$$q_{0.16}^{max} = f(\phi_{ш}) \quad (10)$$

Система оптимального управления шаровым наполнением мельниц основана на зависимости потребляемой полезной мощности двигателя мельницы (P) от шарового наполнения мельниц ($\phi_{ш}$).

$$P = f(\phi_{ш}) \quad (11)$$

На рисунке 3 представлена зависимость потребляемой активной мощности от объемного заполнения шарами для мельницы МШР 3,6×5,0 [11]. На рисунке 4 показана

зависимость между эффективностью измельчения $q_{0.16}^{\max}$ в режиме оптимального пульпового наполнения и объемным заполнением мельницы шарами $\varphi_{ш}$ [11].

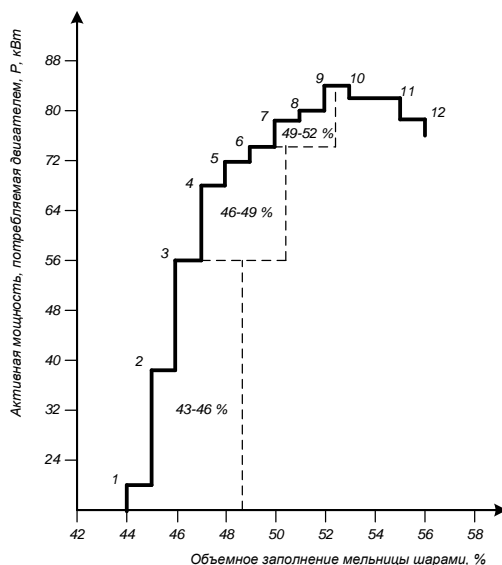


Рисунок 3. Зависимость потребляемой активной мощности от объемного заполнения шарами для мельницы МШР 3,6×5,0 [11]

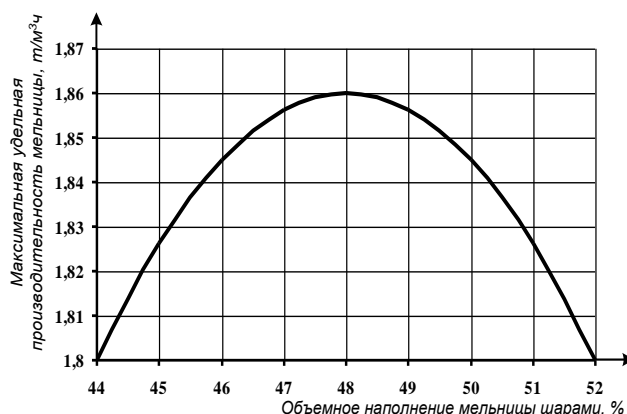


Рисунок 4. Зависимость между эффективностью измельчения $q_{0.16}^{\max}$ в режиме оптимального пульпового наполнения и объемным заполнением мельницы шарами $\varphi_{ш}$ [11]

Заключение

Совершенствование технологических процессов обогащения и создание наиболее эффективного оборудования невозможно без одновременного решения вопросов автоматизации, т.к. достижение наилучших технико-экономических показателей, закладываемых при разработке комплекса «технология – оборудование», возможно лишь при условии, что данный комплекс достаточно полно оснащен средствами автоматического управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туз А.А., Богатиков В.Н. Построение модели процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом ОАО «Ковдорский ГОК» с применением нейросетевых моделей. Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - 5/2013(18). - Вып. 4. - С. 189-198.
2. Голованов Г.А. Флотация Кольских апатитсодержащих руд. М., «Химия», 1976, 216 стр.
3. Золотков Н.Ф., Дёмин В.Т., Концевой А.В., Смирнов С.В. Модернизация и развитие систем автоматизированного контроля и управления // Горный журнал. 2012. №10. С. 91–96.
4. Златорунская Г.Е. Оценка измельчаемости дробленой руды по ее гранулометрической характеристике. Обогащение руд, №2, 1985 г.
5. 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.
6. 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.
7. Классен В.И. Обогащение руд. М., «Недра», 1979 г., 240 стр.
8. Марюта А.Н., Качан Ю.Г., Бунько В.А. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. М., «Недра», 1983 г., 277 стр.
9. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: М., Недра, 1981, 243 с.
10. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых: М., Недра, 1984, 208 с.
11. Кулаков А.Г. Ситуационное управление технологической безопасностью процесса измельчения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук М., 2008.

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

Process Control of grinding and basic directions of their automation

Abstract. The article formulates the main purpose of automation of technological processes. The functional dependencies for the maximum performance of the concentrator. Shows the factors influencing the process of ore concentration. Given the main directions for solving problems of productivity on the finished product processing factory. A study of the factors that determine the performance of the unit wet grinding with a closed cycle. Influence of ore Mineralogy on the performance of wet grinding unit with a closed cycle. Assessment of the technological efficiency of the grinding complex. It is shown that the reduction of the gap between maximum and actual specific capacity of the mill is the main task of optimization of the grinding process. We considered the optimum quantity of pulp in mills. The efficiency of classifying devices. The role of water consumption in the mill.

Keywords: baddeleyite-apatite-magnetite ores; apatite; baddeleyite concentrate; mineral processing; food preparation flotation; apatite flotation; Joint Stock Company "Kovdorsky mining and processing plant"; mineralogical composition of ores; mill performance; study the grinding process; kinetics; mixing; grinding

REFERENCES

1. Tuz A.A., Bogatikov V.N. Postroenie modeli protsessa izmel'cheniya v agregate nepreryvnogo deystviya s zamknutym tsiklom OAO «Kovdorskiy GOK» s primeneniem neyrosetevykh modeley. Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Informatsionnye tekhnologii. – Apatity: Izd-vo KNTs RAN. - 5/2013(18). - Vyp. 4. - S. 189-198.
2. Golovanov G.A. Flotatsiya Kol'skikh apatitsoderzhashchikh rud. M., «Khimiya», 1976, 216 str.
3. Zolotkov N.F., Demin V.T., Kontsevoy A.V., Smirnov S.V. Modernizatsiya i razvitie sistem avtomatizirovannogo kontrolya i upravleniya // Gornyy zhurnal. 2012. №10. S. 91–96.
4. Zlatorunskaya G.E. Otsenka izmel'chaemosti droblenoy rudy po ee granulometricheskoy kharakteristike. Obogashchenie rud, №2, 1985 g.
5. Zlatorunskaya G.E., Boyko A.Yu., Golovanov V.G. i dr. Optimizatsiya protsessov rudopodgotovki i obogashcheniya rud razlichnogo mineralogicheskogo sostava. Nauchno-tehnicheskii progress v PO «APATIT», ch. II, M., 1989 g., 186 str.
6. 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.
7. Klassen V.I. Obogashchenie rud. M., «Nedra», 1979 g., 240 str.
8. Maryuta A.N., Kachan Yu.G., Bun'ko V.A. Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabrik. M., «Nedra», 1983 g., 277 str.
9. Linch A.Dzh. Tsikly drobleniya i izmel'cheniya. Modelirovanie, optimizatsiya, proektirovanie i upravlenie: M., Nedra, 1981, 243 s.
10. Tikhonov O.N. Zakonomernosti effektivnogo razdeleniya mineralov v protsessakh obogashcheniya poleznykh iskopaemykh: M., Nedra, 1984, 208 s.
11. Kulakov A.G. Situatsionnoe upravlenie tekhnologicheskoy bezopasnost'yu protsessa izmel'cheniya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk M., 2008.