

УДК 681.3:669.02.09

## **Оценка уровня совершенствования технологических переделов производства тяжелых цветных металлов методами компьютерного моделирования**

**Б.М. Горенский, Д.Н. Гронь\*, О.В. Кирякова,  
Л.А. Лапина**  
*Сибирский федеральный университет,  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79<sup>1</sup>*

Received 16.11.2009, received in revised form 03.12.2009, accepted 18.12.2009

---

*Описан унифицированный подход к применению информационных технологий вообще и компьютерных тренажеров в частности для исследования технологических переделов производства цветных металлов с целью совершенствования управления технологическим процессом посредством согласования параметров на различных его стадиях.*

*Ключевые слова: система поддержки принятия решений, электролиз меди, автоматизация управления процессом электролиза, компьютерный тренажёр.*

---

### **Введение**

Решение проблемы повышения технико-экономических показателей производства тяжелых цветных металлов может быть достигнуто оптимизацией технологических параметров на отдельных переделах, составляющих технологический цикл. С этой целью необходимо реализовать управление процессом с позиций системного подхода, когда критерием, по которому производится управление, является количество и качество полученного конечного продукта. Например, при производстве тяжелых цветных металлов такими продуктами могут быть товарные медь и никель. Чтобы получить конечный продукт, сырье должно пройти несколько последовательных технологических переделов, на каждом из которых реализуется законченный технологический процесс [1, 2]. Поэтому, чтобы добиться высоких технико-экономических показателей, необходимо оценить степень совершенства технологического процесса на каждой стадии, с тем чтобы применять на них обоснованные управляющие воздействия, позволяющие достигнуть заданных показателей качества управления. Такая задача может быть успешно решена посредством применения информационно-исследовательской системы, основу которой составляют компьютерные тренажеры (КТ), реализованные на основе имитационного моделирования, позволяющие исследовать технологический процесс на каждой стадии (переделе) и работающие в интерактивном режиме [3-5].

---

\* Corresponding author E-mail address: dgron@sfu-kras.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

Таким образом, цель этапа управляемого развития компьютерной системы заключается в создании компьютерных тренажеров для реализации возможности использования имитационного моделирования при исследовании технологических переделов производства цветных металлов. Такой подход позволяет решить проблему исследования технологических процессов цветной металлургии с целью реализации управления многостадийным технологическим процессом с единых методологических позиций на основе системного анализа.

### **Классификация стадий технологического процесса производства цветных металлов**

При производстве тяжелых цветных металлов выделяют такие технологические переделы, как обогащение, агломерирующий обжиг, плавка на штейн в руднотермических печах или плавка Ванюкова, конвертирование штейнов и электролитическое рафинирование никеля и меди с целью получения товарного продукта соответствующего качества (рис. 1) [1, 2]. Технологический процесс на каждой стадии характеризуется автономностью и законченностью и в то же время взаимосвязанностью с технологическими процессами на предыдущей и последующей стадиях. Это обстоятельство предполагает изучение и исследование технологического процесса на каждой стадии с целью организации оптимального управления, что и предпринято в данной работе.

Головной стадией металлургического передела является процесс обогащения, который предназначен для повышения концентрации цветных металлов в перерабатываемом сырье путем удаления пустой породы. Для реализации технологического процесса обогащения необходимо выбрать тип технологического оборудования, рассчитать его количество и режим работы. С этой целью нами разработан и реализован в виде программного продукта КТ для выбора типа и количества мельниц, их производительности и режима работы. КТ позволяет произвести выбор обогатительного оборудования исходя из достижения заданных показателей качества получаемого продукта. КТ работает в интерактивном режиме, что позволяет по мере изучения процесса и исследования его характеристик оперативно изменять номенклатуру применяемого оборудования и режим его работы. Общий вид КТ для исследования процесса обогащения медно-никелевых руд приведен на рис. 2.

Последовательно реализуя приведенные стадии работы КТ, добиваемся заданных показателей процесса извлечения, что позволяет повысить эффективность технологического процесса на последующей стадии обжига.

На следующей стадии - стадии агломерирующего обжига производится выжигание серы, содержащейся в руде с получением медно-никелевого агломерата заданного химического и гранулометрического состава. Процесс агломерирующего обжига рассмотрен как динамическая система с сосредоточенными параметрами. На основании уравнений физико-химических превращений построена математическая модель процесса, включающая уравнения материального и теплового балансов. При производстве агломерата одним из параметров, оказывающих определяющее влияние на технологический процесс, является температура процесса. Математическая модель КТ представляет собой систему нелинейных уравнений второго порядка. Выходным параметром, по которому производится управление, является температура процесса, управляющими параметрами – количество и химический состав загружаемой шихты, количе-

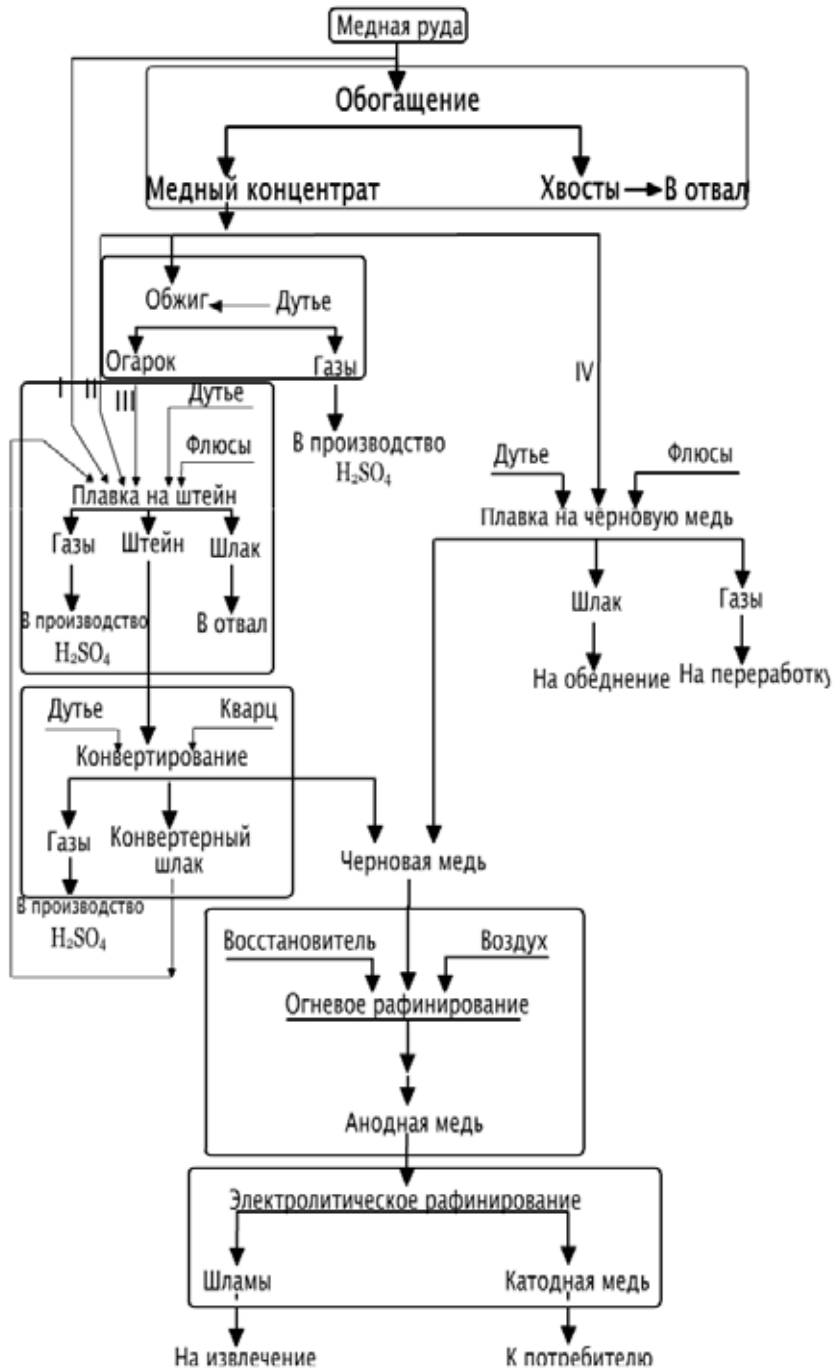


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема пирометаллургии меди

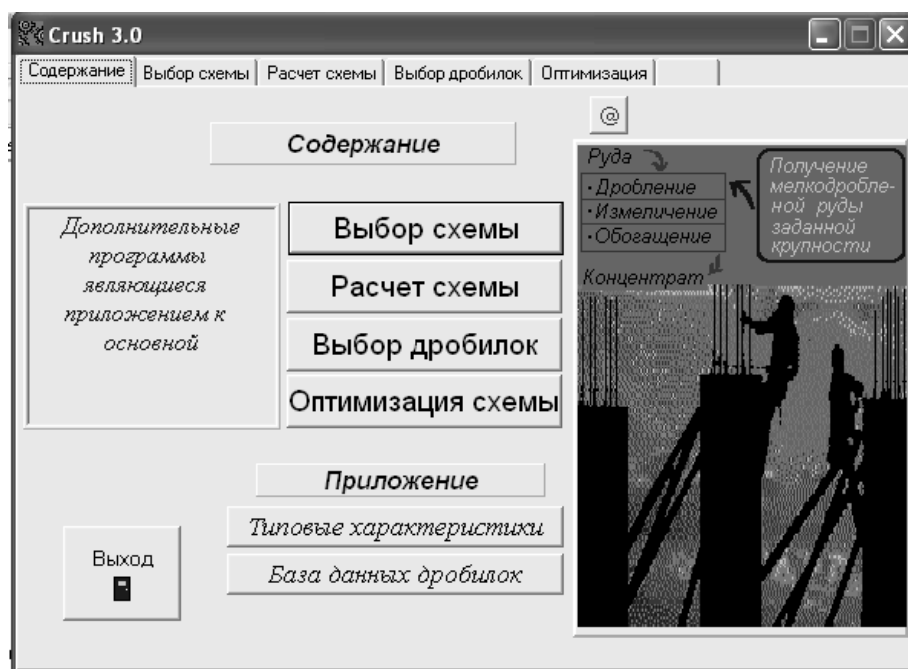


Рис. 2. Головное меню КТ для исследования процесса обогащения

ство и температура охлаждающей воды. Изменение температуры процесса осуществляется в динамическом режиме и выводится на экран дисплея. Оператор имеет возможность визуального контроля температуры и, в соответствии с ее изменением, оперативно управлять процессом посредством изменения управляющих воздействий. Таким образом, управляя температурным режимом, можно оперативно управлять количеством и химическим составом получаемого агломерата, который является исходным продуктом при плавке на штейн.

### Исследование технологического процесса плавки в рудотермических печах

Одним из распространенных способов получения медно-никелевого штейна является плавка медно-никелевого агломерата в рудотермических печах (РТП). Технологический процесс плавки медно-никелевого агломерата в РТП относится к сложным взаимосвязанным процессам, протекающим в химически агрессивных средах при высокой температуре в металлургических агрегатах большой единичной мощности, оснащенных только локальными системами автоматического регулирования. Поэтому для достижения высоких технико-экономических показателей процесса плавки в РТП необходимо создание взаимосвязанных высокоэффективных АСУ или систем поддержки принятия решений (СППР), реализованных на базе компьютерных тренажеров. Следует отметить, что второй путь является более приемлемым, так как требует для своей реализации меньших временных и капитальных затрат. Исследование технологического процесса плавки в РТП реализуется с помощью компьютерного тренажера. Общий вид экранной формы компьютерного тренажера для исследования процесса плавки медно-никелевого агломерата в РТП приведен на рис. 3. На экране дисплея представлена мнемосхема исследуемого процесса, на которой условно изображен металлургический агрегат, приведена основная контрольно-измерительная и пускорегулирующая аппаратура, применяе-

мая для управления процессом плавки в РТП, приведен график изменения одного из выходных параметров. КТ работает в диалоговом режиме и позволяет исследовать влияние основных управляющих воздействий, к которым относится регулирование электрического режима и загрузки шихты по основным составляющим, на изменение основных выходных показателей. К выходным показателям, которые характеризуют эффективность функционирования процесса, относятся производительность РТП П, удельный расход электроэнергии  $W_{уд}$ , содержание меди и никеля в отвальном шлаке  $C_m, C_n$ , выбросы вредных газообразных веществ в атмосферу  $G_{гв}$  и температура расплава шлака  $T_{шл}$ , для расчета которых составлены математические модели.

Основой функционирования КТ является математическая модель процесса, построенная по уравнениям материального и теплового балансов. Уравнение материального баланса процесса плавки в РТП по основным элементам представим как систему с сосредоточенными параметрами в следующем виде:

$$\frac{d(V C_m)}{dt} = G_{ac} C_{10} + G_C + G_{SiO_2} + G_{кш} C_{20} - G_{шл} C_{11} - G_n C_{21} - G_c C_{31}. \quad (1)$$

Уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} = & K_{\rho} \rho I^2 + G_{кш} L_{кш} T_{кш} + G_a \Delta H_a T_a + G_c \Delta H_c T_c - \\ & - G_{SiO_2} L_{SiO_2} \cdot (T_p - T_{SiO_2}) - hF(T_p - T_{ог}) - G_{ог} L_{ог} (T_p - T_{ог}) - \\ & - G_{шл} L_{шл} T_{шл} - G_{ум} L_{ум} T_{ум}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V_a$  – объем реакционной зоны РТП;

$C_m$  – концентрация металлов в реакционной зоне;

$G_a, G_C, G_{SiO_2}, G_{кш}$  – входные потоки агломерата, восстановителя, диоксида кремния, конвертерного шлака соответственно;

$C_{10}, C_{20}$  – концентрация металлов, соответственно, в агломерате и конвертерном шлаке;

$C_{11}$  – концентрация цветных металлов в отвальном шлаке;

$G_n$  – количество выносимой пыли;

$C_{21}$  – концентрация металлов в пыли;

$G_{гв}$  – количество выбрасываемого в атмосферу газа;

$C_{31}$  – концентрация основных элементов в газе;

$I$  – ток электрода;

$\rho$  – удельное сопротивление расплава шлака;

$K_{\rho}$  – коэффициент, учитывающий степень преобразования электрической энергии в тепловую;

$L_{кш}, L_{SiO_2}, L_{ог}, L_{шт}, L_{шл}$  – теплоемкость заливаемого конвертерного шлака, диоксида кремния, отходящих газов, штейна и шлака соответственно;

$\Delta H_a, \Delta H_c$  – тепловой эффект реакции сгорания серы и угля соответственно;

$T_{кш}, T_a, T_c, T_p, T_{SiO_2}, T_{ог}, T_b, T_{шл}, T_{шт}$  – температура конвертерного шлака, загружаемого агломерата, кокса, расплава, диоксида кремния, охлаждающей воды, воздуха, шлака и штейна соответственно;

$h$  – коэффициент теплопередачи от расплава к окружающей среде;

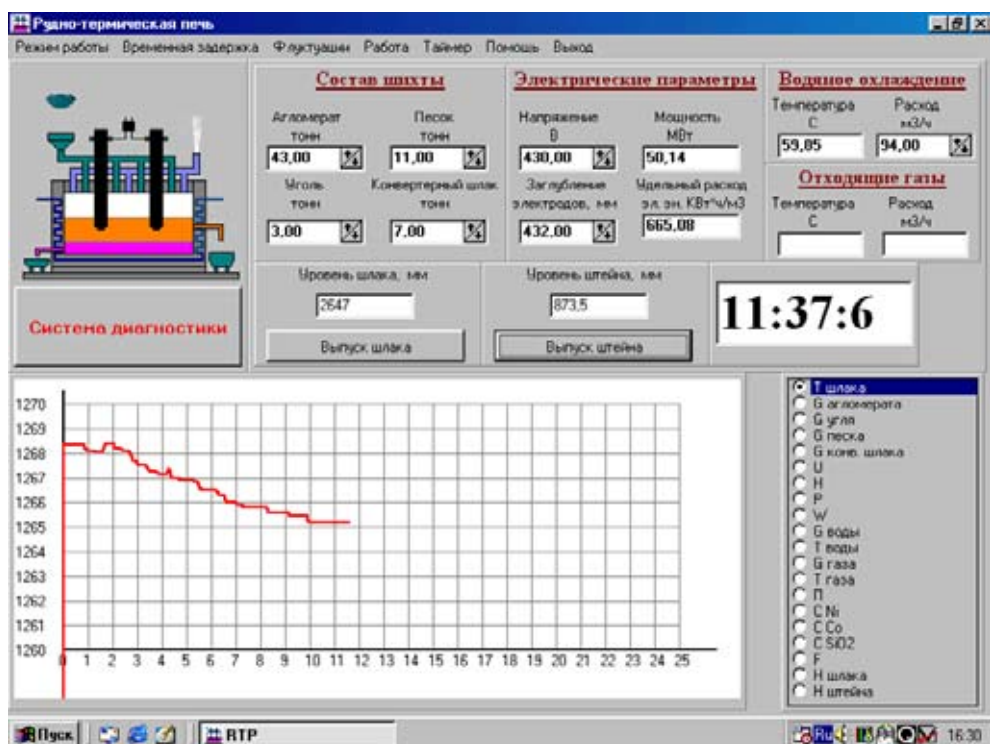


Рис. 3. Мнемосхема процесса плавки в РТП, представленная на экране монитора

$F$  – площадь стенок печи;

$G_{ог}, G_{шл}, G_{шт}$  – количество отходящих газов, выпускаемого шлака и штейна соответственно.

На основании уравнений изменения выходных параметров составлены математические модели для расчета управляющих воздействий. Так, модель расчета управляющих воздействий представляет собой систему двух уравнений и позволяет рассчитывать ввод электрической мощности  $P_{сум}$  и количество загружаемой шихты  $G_{шх}$  в зависимости от прогноза изменения выходного параметра:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= a_0 + a_1 (P_3 - P_i) + a_2 (W_{уд.з} - W_{уд.и}) + a_3 (C_{м.з} - C_{м.и}) + a_4 (G_{г.з} - G_{г.и}) + a_5 (T_{шл.з} - T_{шл.и}) \\ G_{ш}(t) &= b_0 + b_1 (P_3 - P_i) + b_2 (W_{уд.з} - W_{уд.и}) + b_3 (C_{м.з} - C_{м.и}) + b_4 (G_{г.з} - G_{г.и}) + b_5 (T_{шл.з} - T_{шл.и}), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где индексом з обозначено заданное (предпочтительное) значение контролируемого параметра, а индексом и – текущее значение параметра;  $P$  – производительность;  $W$  – удельный расход электроэнергии;  $G_{ш}$  – количество загружаемой шихты;  $P$  – вводимая мощность;  $T_{шл}$  – температура шлака;  $C_m$  – количество металла в отходных шлаках;  $G_r$  – количество отходных газов.

Особенностью расчета управляющих воздействий является то, что они определяются в зависимости от отклонения прогнозируемого значения параметра от его текущего значения, а количество загружаемой шихты определяется как сумма по отдельным составляющим. Таким образом, использование КТ позволяет исследовать реакцию объекта на различные варианты управления процессом и выбрать режим, в наибольшей степени отвечающий поставленным

требованиям. Рассчитанные управляющие значения целесообразно использовать для управления РТП технологическим процессом в СППР.

### **Исследование технологического процесса конвертирования штейна**

Получение черновой меди является следующей технологической операцией и в настоящее время осуществляется посредством окисления железа и серы продувкой через слой расплавленного штейна воздуха или дутья, обогащенного кислородом. Такой процесс получил название «конвертирование». Продувка штейна сопровождается переводом оксида железа в шлак, а сернистого газа – выбросом в атмосферу.

Для конвертирования штейнов используют агрегаты, называемые горизонтальными конвертерами, которые представляют собой цилиндрические поворотные аппараты периодического действия.

В верхней части конвертера имеется горловина, через которую заливают жидкий штейн, загружают холодные материалы, отводят газы и сливают конвертерный шлак и черновую медь.

Компьютерный тренажер реализует логическое управление процессом: выбор последовательности выполняемых действий оператором; проверка правильности их очередности; сигнализация аварийных состояний в случаях неверных действий оператора, для чего на мнемосхеме компьютерного тренажера выведены основные средства контроля и управления.

В случае неверных действий КТ выдает сообщения об этом и рекомендации по дальнейшим действиям оператора.

На рис. 4 представлена мнемосхема процесса конвертирования с основной контрольно-измерительной и пускорегулирующей аппаратурой, применяемой на рабочем месте. Мнемосхема процесса отображается на экране монитора КТ.

На мнемосхеме показано:

- конвертер, принимающий различные положения;
- пульт оператора, на котором устанавливаются значения основных входных и управляющих параметров;
- информация об операциях, выполняемых в текущий момент времени.

Элементами управления компьютерного тренажера являются функциональные кнопки и клавиши, которые служат аналогами органов контроля и управления, используемых на реальном производстве. Такой подход позволяет максимально адаптировать КТ к условиям реального металлургического производства. Поэтому результаты исследования и навыки управления, полученные на компьютерном тренажере, легко адаптировать к условиям реального технологического процесса или агрегата.

Компьютерный тренажер позволяет отработать принципы управления процессом конвертирования медных штейнов в штатных режимах и в условиях аварийных ситуаций без вмешательства в реальное производство.

Начинается процесс конвертирования с заливки штейна. По истечении 45 мин в информационном поле «состояние процесса» программа сообщит, что необходимо повернуть конвертер на 100° для слива шлака (рис. 5).

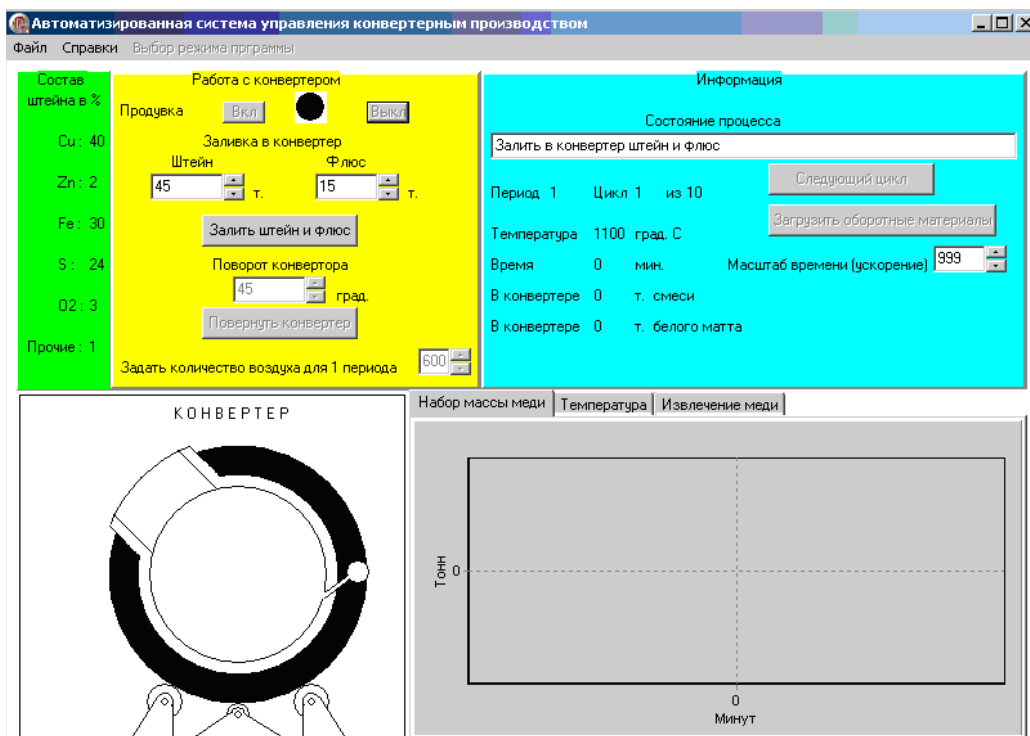


Рис. 4. Мнемосхема процесса конвертирования, реализуемого на КТ

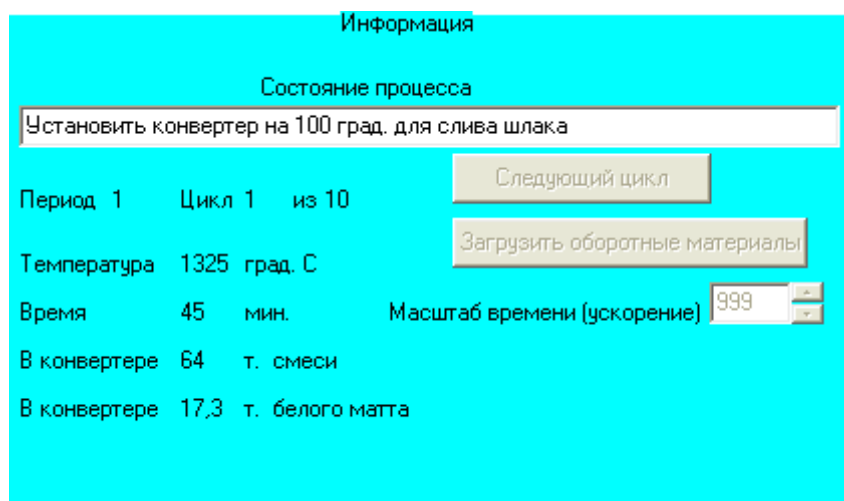


Рис. 5. Информация по ведению процесса



Чтобы закончить первый цикл первого периода, нужно отключить дутье кнопкой "ВЫКЛ", повернуть конвертер на нужный угол, в данном случае на 100°, и нажать на кнопку "ОК". Произойдет слив шлака, и на этом закончится первый цикл первого периода.

По окончании 1-го цикла 1-го периода будут построены графики по набору массы в конвертере (рис. 6) и изменению температуры по ходу процесса (рис. 7).

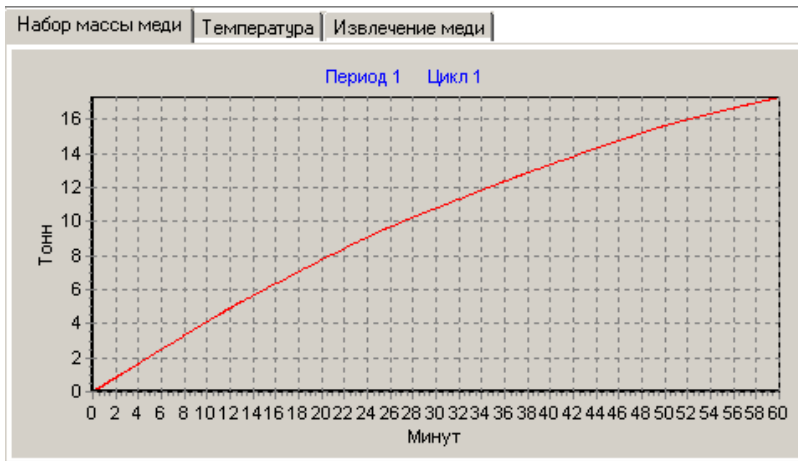


Рис. 6. Набор массы в конвертере

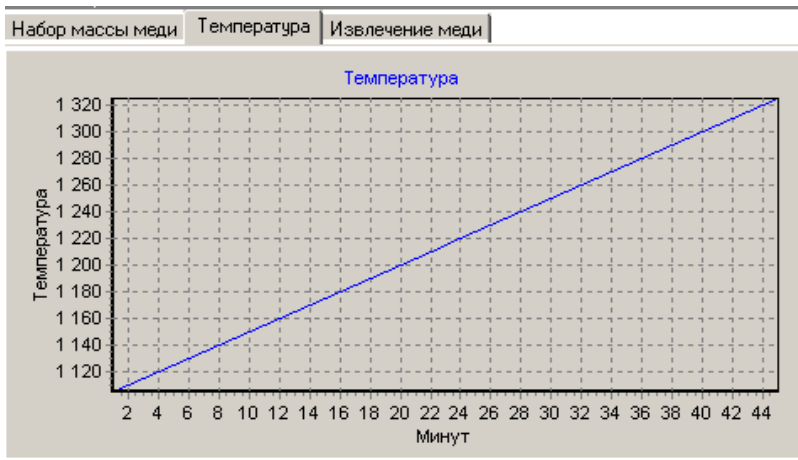


Рис. 7. Изменение температуры

Для перехода к следующему циклу нажимается кнопка "СЛЕДУЮЩИЙ ЦИКЛ". Новый цикл начинается с того, что нужно снова повернуть конвертер на 45° и нажать на кнопку "ПОВЕРНУТЬ КОНВЕРТЕР", залить в конвертер необходимое количество штейна и флюса (в последующих циклах количество заливаемого штейна и флюса будет составлять 24 т и 8 т соответственно). И так до тех пор, пока не будут пройдены все циклы, после чего осуществляется переход ко второму периоду.

Порядок действий во втором периоде аналогичен первому. Однако процесс ведется без загрузки дополнительных порций штейна и флюса, а температура поддерживается путем за-

грузки оборотных (холодных) материалов. В случае неполадок и неправильного ведения процесса, например, застания фурм штейном из-за неверной очередности действий обучаемого, программой выдаются соответствующие сообщения.

### **Исследование процесса электролитического рафинирования меди**

Процесс электролиза в водных электролитах является завершающей стадией технологического процесса получения меди и никеля. Несмотря на большое значение данного передела для всего технологического цикла электролизные ванны для электролитического рафинирования никеля и меди в настоящее время практически не оснащены средствами АСУ ТП. Электролизные ванны снабжены только автоматическими средствами контроля температуры, напряжения и силы тока, которые сосредоточены в диспетчерской цеха. Другие технологические параметры, такие как содержание ионов никеля, хлора, сульфата борной кислоты, а также примесей в электролите, равномерность распределения тока по электродам, измеряются и контролируются вручную ежедневно.

Равномерность распределения тока по электродам, от которой зависит качество меди, проверяют с помощью электромагнитного щупа, измеряя силу тока, проходящего через каждый катод. В случае очень высокой силы тока, проходящей через электрод, надо проверить, нет ли короткого замыкания, и, если оно есть, устранить его.

Отсутствие автоматического анализа и регулирования параметров ведёт к менее качественному управлению процессом, что сказывается на качестве меди и показателе выхода по току.

Входная информация используется для снятия характеристик электролизёра и дальнейшей оценки по ним характеристик исследуемого процесса. Для электролитического рафинирования меди входными параметрами будут: сила тока на электролизёре; скорость подачи электролита; содержание анода; состав электролита; количество анодов в электролизёре.

В качестве выходной информации можно использовать следующие технологические показатели: выход по току; расход электрической энергии; удельный расход электрической энергии; производительность электролизёра.

Как показывает анализ входных и выходных параметров, визуальный контроль за их изменением представляет значительную трудность. Эту трудность можно преодолеть с использованием информационно-управляющей системы (ИУС), с помощью которой можно оперативно оценивать технологические состояния процесса электролиза или процесса электролитического рафинирования.

Основой ИУС является компьютерный тренажер для исследования процесса электролитического рафинирования меди. Общий вид мнемосхемы компьютерного тренажера представлен в виде главного окна программы (рис. 8).

В окне программы приведена мнемосхема электролизера, на которой представлен пульт оператора-технолога с указанием основной контрольно-измерительной и пускорегулирующей аппаратуры и графика изменения выходного параметра.

Компьютерный тренажер работает в интерактивном режиме, позволяет исследовать технологический процесс электролиза и может применяться для обучения персонала. С этой целью разработан алгоритм работы, математическое и программное обеспечение тренажера.

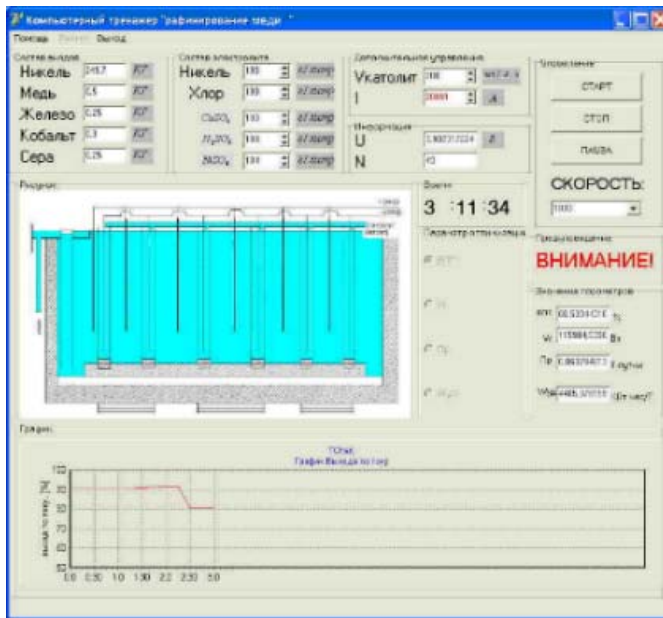


Рис. 8. Общий вид главного окна программы

Компьютерный тренажер используется для исследования технологического процесса электролиза меди и выработки рекомендаций по управлению в системе поддержки принятия решений. За счёт выбора обоснованных управляющих воздействий, определенных с помощью компьютерного тренажера, возможно на 3-5 % сократить удельный расход электроэнергии и на 0,5-1 % увеличить извлечение меди. Другим важным направлением применения компьютерного тренажера является обучение персонала электролизных цехов навыкам оптимального управления.

### Заключение

Разработана информационно-исследовательская система для исследования технологических переделов производства тяжелых цветных металлов, реализованная на базе имитационного моделирования и компьютерных тренажеров. Система позволяет в интерактивном режиме ознакомиться с процессом, исследовать технологический процесс на любом из металлургических переделов и принимать по результатам исследования обоснованные решения по управлению технологическим процессом на данном переделе, направленные на повышение технико-экономических показателей производства тяжелых цветных металлов.

### Список литературы

1. Гронь Д.Н. Компьютерный тренажер для исследования электролиза никеля // Совершенствование методов поиска и разведки, технологии добычи и переработки полезных ископаемых: сборник материалов Межрегиональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / сост. В.В. Сувейзда; ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ». – Красноярск, 2006. – 289 с.

2. Гронь Д.Н., Горенский Б.М. Компьютерный тренажер для имитирования процесса электролитического рафинирования меди // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании: сборник работ XX Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2007.
3. Гронь Д.Н., Горенский Б.М. Основы построения тренажеров для исследования процессов электролитического рафинирования меди // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании: сборник работ XX Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2007.
4. Грейвер Н.С. Основы металлургии: в 2 т. – М.: Металлургия, 1961. – Т.1.
5. Уткин Н.И. Цветная металлургия (технология отрасли): учебник. – М.: Металлургия, 1990.
6. Горенский Б.М. Автоматизированные системы имитационного управления объектами цветной металлургии: монография / КГАЦМиЗ. – Красноярск, 2002.
7. Горенский Б.М., Годовицкая Т.А., Даныкина Г.Б. Информационные технологии в металлургии: учебное пособие // ГОУ ВПО “Гос. ун-т цвет. металлов и золота”. – Красноярск, 2006.
8. Горенский Б.М., Даныкина Г.Б., Кирякова О.В. Новые информационные технологии в управлении металлургическими процессами: лаб. практикум / ГОУ ВПО “Гос. ун-т цвет. металлов и золота”. – 2-е изд., испр. и доп. – Красноярск, 2006.

## **Estimation of Perfection level of Technological Repartitions of Heavy Nonferrous Metals Manufacture by Methods of Computer Modeling**

**Boris M. Gorensky, Dmitry N. Gron,  
Oksana V. Kiryakova and Larisa A. Lapina**  
*Siberian Federal University,  
79 Svobodny, Krasnoyarsk 660041 Russia*

---

*There has been described a unified approach of application of information technology in general and computer training apparatus in particular, for research of technological repartitions of nonferrous metals manufacture for the purpose of management perfection of technological process at each stage by the coordination of parameters at various stages.*

*Keywords: System of support of decision-making, electrolysis of copper, automation of electrolysis management, a computer training apparatus.*

---