

УДК 669.013

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЛАВКИ ПВ-3 МЕДНОГО ЗАВОДА ЗФ ОАО «ГМК «НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ»»

© 2014 г. **А.В. Спесивцев, И.Н. Дайманд, В.И. Лазарев, А.П. Кащук**

ООО «Сумма технологий», г. Санкт-Петербург

ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»», г. Норильск

Статья поступила в редакцию 28.02.13 г., подписана в печать 24.09.13 г.

Особенностью синтезированной интеллектуальной автоматизированной системы управления (ИАСУ) ПВ-3 применительно к процессу Ванюкова на медном заводе Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель»» является использование универсального описания сложной многофакторной модели в виде семантической сети на специфичном ограниченном словаре. Это существенно снижает размерность предметной области без потери семантики с сохранением функциональности всех ее элементов. Применение уникальной методики извлечения и формализации экспертных знаний в аналитическое выражение позволяет производить свертку разнородной по своей физической природе информации в полиномиальные модели именно для данного процесса, явления или объекта. Показана эффективность применения ИАСУ ПВ-3 при реализации концепции управления на основе «принципа разрешения конфликтов» в промышленных условиях.

**Ключевые слова:** процесс Ванюкова, многофакторная модель, семантическая сеть, специфичный ограниченный словарь, онтология, неявные экспертные знания, принцип разрешения конфликтов, степень согласованности процесса, мультимодальность, математическая статистика, автоматизированная система управления.

Peculiarity of Synthesized Smart Management Control System (SSMCS) PV-3 with regard to Vanyukov Process at copper production Zapolyarny branch of OJSC «Mining and Metallurgical Complex «Norilsk Nickel»» is use of universal description of complex multifactor model in the form of semantic network on specific restricted vocabulary. That is substantially decreased dimension of subject area without losses of semantic with retention of operability of all their elements. Application of tailor-made method of acquisition and formalization knowledge in analytical expression allows perform convolution of multivendor on its physical nature information into polynomial model exactly for given process, phenomenon or object. There was showed efficiency of application of SSMCS PV-3 while execution concept of management on the base of «principle of settlement of conflicts» in industrial conditions.

**Key words:** Vanyukov process, multifactor model, semantic network, specific restricted vocabulary, ontology, tacit expert knowledge, principle of settlements of conflicts, degree of consistence of process, multimodality, mathematical statistics, management control system.

### ВВЕДЕНИЕ

Управление процессом Ванюкова в агрегате ПВ-3 при переработке сульфидной шихты на штейны с высоким содержанием меди представляется сложной многопараметрической задачей, для решения которой нет возможности предложить формальную модель. Основным фактором, приводящим к нестабильности и неустойчивости в любые попытки формализации, является неопределенность входных переменных. Так, например, неопределенность информационного канала «шихта» выражается в колеблемости химического состава и влажности

шихты в достаточно широких диапазонах, а точные значения этих параметров в каждый момент времени неизвестны по вполне объективным причинам. Следствием этого является нарушение основных критериев технологической согласованности процесса, что влияет на качество конечных продуктов плавки и стабильность работы агрегата в целом.

В таких условиях существенной неопределенности при рассмотрении задачи удержания технологической согласованности процесса плавления в печи Ванюкова целесообразно использовать методы

**Спесивцев А.В.** – канд. техн. наук, доцент, акад. МАНЭБ, вед. инженер ООО «Сумма технологий» (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Шателена, 26А). Тел.: (812) 334-72-25. E-mail: sav2050@gmail.com.

**Дайманд И.Н.** – гл. инженер проекта ООО «Сумма технологий». Тел.: (812) 334-72-25. E-mail: pildery@gmail.com.

**Лазарев В.И.** – нач. технич. отдела медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»» (663300, г. Норильск, ул. Вокзальная, 6). Тел.: (3919) 256-254. E-mail: lazarev@mz.nk.nornik.ru.

**Кащук А.П.** – нач. плавильного участка плавильного цеха медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»». Тел.: (3919) 256-406.

экспертного оценивания ситуации и формирования вывода, опирающегося на знания эксперта [1, 2].

Контроль и управление всеми агрегатами и исполнительными механизмами печи Ванюкова ПВ-3 осуществляется со станций оператора автоматизированной системы управления (АСУ). При этом используется информация не только от датчиков и исполнительных механизмов, но и органолептическая, которую плавильщик, наблюдая характерные особенности поведения ванны расплава (величину и «тяжесть» брызг, температурный ход ванны расплава и др.), передает на пульт оператору. Все эти источники информации в совокупности позволяют оператору оценивать сложившуюся ситуацию по многим переменным — например, «высота ванны», «температура расплава», а также более обобщенное понятие «состояние ванны».

Однако производственные условия, например нештатный проплав большого количества техногенного сырья, приводят к потере технологической согласованности процесса Ванюкова, вследствие чего оператор, оценивая состояние агрегата, принимает не всегда верные решения и «теряет» либо температуру расплава, либо качество конечных продуктов.

Компания «Сумма технологий» в 2011—2012 гг. выполнила разработку интеллектуальной АСУ печи Ванюкова (ИАСУ ПВ-3) медного завода Заполярного филиала (ЗФ) ОАО «ГМК “Норильский никель”» на базе платформы G2 фирмы «Gensym» (США) для решения ряда задач по управлению процессом Ванюкова, важнейшими из которых являются:

- стабилизация качества продуктов плавки;
- оценивание неизмеряемых или плохо измеряемых параметров технологического процесса и состояний агрегатов косвенными вычислениями;
- снижение энергоемкости процесса переработки шихты;
- стабилизация температурного режима процесса при сохранении плановых заданий.

В данной статье представлены результаты опытно-промышленной эксплуатации ИАСУ ПВ-3 медного завода ЗФ ОАО «ГМК “Норильский никель”».

## 1. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ИАСУ ПВ-3

Для сложных технических систем (СТС), к которым относится и процесс Ванюкова, реализуемый в печи Ванюкова ПВ-3, предлагается новая концепция контроля функционирования и диагностиро-

вания в динамике управления. Суть главной идеи данной концепции состоит в организации своевременного опережающего обнаружения и устранения причин возможного перехода СТС из работоспособного состояния в неработоспособное, используя методы системного анализа. Важнейшими принципами системного анализа являются принципы многокритериальности и полимодельности [3].

Задача структурно-функционального синтеза облика ИАСУ включает технологии системного моделирования, традиционно связанные с количественными вычислениями, и интеллектуальные информационные технологии, основанные на знаниях. Это означает, что ИАСУ должна обеспечивать возможность реализации всей цепочки последовательных действий, позволяющих через множество измеряемых признаков и дополнительных вычислений необходимых недостающих параметров с использованием экспертных знаний распознавать технологическое состояние процесса и по нему осуществлять выбор корректных управленческих решений.

Основной парадигмой создаваемой ИАСУ ПВ-3 является синтез многомодельного описания процесса Ванюкова на основе неявных экспертных знаний в виде аналитических выражений и представления этих знаний в виде семантической сети на базовой онтологии, т.е. на специфичном ограниченном словаре [4]. При этом первое позволяет производить свертку разнородной по своей физической природе информации в полиномиальные модели на основе использования действительно «интеллектуальных знаний», поскольку они характеризуют опыт и интуицию эксперта именно для процесса Ванюкова и именно для ПВ-3 медного завода компании «ГМК “Норильский никель”», а второе — описать сложную многофакторную модель в виде семантической сети на специфичном ограниченном словаре, что существенно снижает размерность предметной области без потери семантики и функциональности всех ее элементов.

## 2. КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПВ-3 НА ОСНОВЕ «ПРИНЦИПА РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ»

Сочетание описанных выше уникальных методологий позволило создать интеллектуальную экспертную систему для управления процессом Ванюкова, функционирующим, как и все СТС, в условиях «существенной неопределенности».



Рис. 1. Главная форма приложения ИАСУ ПВ-3 «Эксперт»

Главное окно ИАСУ ПВ-3 показано на рис. 1, где цифрами пронумерованы его составные части:

1 — графическое отображение одного из основных критериев — «удельный расход кислорода на тонну металлосодержащих»: нижнее — по фактическим данным ведения процесса, верхнее — рекомендуемое системой;

2 — отображение критерия «степень согласованности процесса»;

3 — отображение критерия «содержание меди в штейне»: нижний график соответствует результатам химического анализа, средний — фактическим данным ведения процесса, верхний — прогнозируемому состоянию при выполнении рекомендаций системы;

4 — индикатор «содержание меди в шлаке»;

5 — индикатор «процент флюсов от металлосодержащих»;

6 — индикатор «качество загрузки»;

7 — индикатор «перепад температуры воды 1–2 ряда кессонов»;

8 — поле индикации «конфликтов»;

9 — поле управления оператором качественными переменными.

Как показывает практика эксплуатации ПВ-3, множество фактически встречающихся режимов (рис. 2) гораздо шире «области согласованности» и полностью покрывает ее. При этом, находясь в различных зонах допускаемых фактических режимов, но вне «области согласованности», процесс «испытывает» постоянные «конфликты» при стремлении достичь этой зоны. Так, при идентификации состояния процесса в зоне 1, где пересекаются области допустимых нагрузок и качества шихты, понятие «конфликт» может выражать избыток или недостаток флюса по отношению к металлосодержащим, в

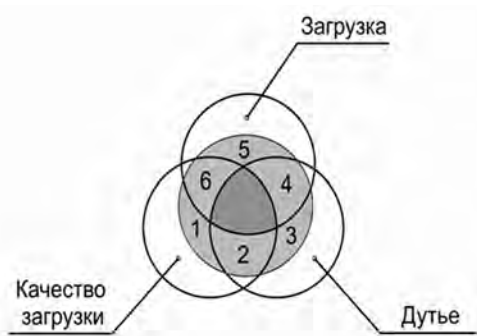


Рис. 2. К обоснованию парадигмы идентификации и разрешения конфликтов

зоне 2 — низкое качество шихты по металлосодержащим, 3 — неблагоприятные сочетания качества загрузки с нехваткой кислорода и избытком подачи природного газа, 4 — недостаток или избыток дутья, 5 — горячий или холодный ход печи, 6 — недостаток или избыток загрузки шихты.

Новая парадигма заключается в выявлении «конфликтов», т.е. состояний процесса ПВ за границами «области согласованности», но в пределах «области фактических режимов», по какому-либо из параметров и поиск по моделям нескольких вариантов движения процесса к «области согласованности». «Степень согласованности» в новой парадигме, таким образом, сохраняется, но выступает переменной, численные значения которой способны в масштабе реального времени указывать на наличие конфликта и, кроме того, характеризовать качество работы процесса в целом.

С одной стороны, понятие «качество ведения процесса» как профессиональный критерий отсутствует и работу смены оценивают обычно по качеству конечных продуктов плавки, но с другой — понятно, что достижение высокого качества конечных продуктов невозможно без достаточно высокой степени согласованности и управляющих переменных, и принимаемых решений оператора. Такая синтетическая переменная — «степень согласованности» — способна, на наш взгляд, характеризовать «качество ведения процесса» в широком смысле понимания этого определения.

Таким образом, разработанная ИАСУ ПВ-3 использует принцип ведения процесса в достаточно узком «коридоре» по основным критериям технологической согласованности процесса с целью улучшения качества конечной продукции и сохранения эксплуатационных свойств агрегата. ИАСУ ПВ-3 прогнозирует заранее возможные нарушения тех-

нологической согласованности путем анализа разработанных на базе экспертных знаний критериев. Критерии задают цели управления процессом и информируют оператора о текущем состоянии процесса.

Например, нахождение процесса по критерию «удельный расход кислорода на тонну металлосодержащих» за пределами обозначенных на рис. 1 верхней и нижней границ в течение более 10 мин способно привести к критическим состояниям: ниже  $150 \text{ м}^3/\text{т}$  — недоокисление расплава и, как следствие, холодный ход печи; выше  $250 \text{ м}^3/\text{т}$  — переокисление расплава и, соответственно, горячий ход печи.

Выход значений критериев за допустимые границы интерпретируется системой как «конфликты», а для оператора является сигналом к необходимости принятия рекомендуемых управляющих воздействий для возврата процесса в состояние технологической согласованности. Такой подход позволяет заблаговременно информировать оператора о возможном наступлении критических ситуаций в самом начале возникновения технологического дисбаланса и принимать соответствующие меры для предупреждения их дальнейшего развития.

### 3. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИАСУ ПВ-3

Рассмотрим на рис. 1 поведение графиков изменения основных показателей по ходу процесса за отображаемый период более 2 ч. Такой период отображения приурочен к частоте отбора проб штейна на химический анализ и позволяет проанализировать работу оператора между фактическими показаниями содержания меди в штейне.

По критерию «удельный расход кислорода на тонну металлосодержащих» видно (см. рис. 1, поз. 1), что оператор вел процесс ниже рекомендуемого на уровне  $\sim 180 \text{ м}^3/\text{ч}$ , чем и обусловлено пониженное содержание прогнозируемого содержания меди в штейне 54,6 % (поз. 3, средний график). В случае выполнения рекомендаций системы ожидаемый прогноз по меди в штейне даст значение  $\sim 58,3$  %. Отметим, что показатель по факту 52 % меди относится предыдущему 4-часовому периоду и достаточно обоснованно отражает холодный ход процесса (поз. 1, нижний график) на предельно низких ( $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) значениях удельного расхода кислорода. При этом система информирует оператора о наличии конфликтов (поле 8) и рекомендует снизить загрузку ме-

таллосодержащих с 59 до 51 т/ч для поднятия удельного расхода кислорода, что дало бы возможность повысить температуру расплава и ликвидировать конфликт по его недоокислению.

Здесь уместно дать пояснение относительно прогноза содержания меди в штейне. ИАСУ ПВ-3 рассчитывает прогнозную величину этого показателя для барботажной зоны на минутном интервале времени. Особенность расчета в таком виде обусловлена теоретическими исследованиями и специальными экспериментами, изложенными в фундаментальном труде [5]. Там показано, что окончательный состав штейна формируется в барботажной зоне ванны расплава и далее в подфурменной зоне уже не изменяется. Кроме того, барботажную зону можно считать «аппаратом идеального перемешивания» и, как следствие, декларировать однородность состава образующегося штейна по всей площади зеркала ванны в данный момент времени (в нашем случае — каждую минуту). Однако, вследствие неоднородности состава шихты и изменения скорости ее подачи в реакционную зону печи даже на минутном интервале, содержание меди в штейне подвержено существенным флуктуациям. Поскольку скорость осаждения «штейнового дождя» в супутном потоке штейно-шлаковой эмульсии для каждого размера диаметров корольков практически постоянна, но существенно различна, то перемешивание капель штейна в подфурменной зоне возможно только частично из-за разности этих скоростей. Так, скорость осаждения капель штейна от 0,2 до 0,5 мм составляет 1—4 см/с, а суммарный вклад этих частиц в общей массе штейна превышает 70 %. Подобное обстоятельство приводит частично к послонному накоплению штейновых капель в штейновой ванне. Некоторое осреднение состава штейна происходит также за счет направленного его движения в сторону штейнового сифона и поднятия в самом сифоне при сливе через штейновый шпур. Однако достоверных данных о степени перемешивания штейновой ванны в технической литературе по ПВ не имеется.

С учетом времени осаждения капель штейна (0,5—1,3 мин) и продолжительности смены всей штейновой ванны (~4 ч) приходится констатировать, что сравнение результатов химических анализов 2-часовых проб меди в штейне с рассчитанным ее содержанием по модели в барботажной зоне сопряжено с трудностями и правомерно только в условиях постоянства загрузки по массопотоку и составу.

Тем не менее прогнозируемые значения этой переменной являются одними из основных показателей качества работы процесса в целом и для оператора служат ориентиром, по которому он сверяет возможность выполнения сменного задания по данному показателю.

Эмульция содержания меди в штейне осуществляется по модели  $Y$ :

$$Y = 60 + 6,875X_1 - 1,25X_2 - 0,625X_3 + 0,625X_4 - 0,625X_1X_2 + 0,625X_1X_4 - 0,625X_2X_3 + 0,625X_2X_4 - 0,625X_1X_2X_4,$$

где  $X_1$  — удельный расход кислорода на 1 т металло-содержащих (МС), м<sup>3</sup>/т;  $X_2$  — доля техногенных от МС;  $X_3$  — отношение обороты/лежалые;  $X_4$  — содержание меди в концентрате (качественная переменная);  $Y$  — содержание меди в штейне, %.

Как видно из рис. 1, расположенные в главном окне индикаторы информируют оператора о состоянии процесса и по другим переменным, в частности об удовлетворительном состоянии по содержанию меди в шлаке (поз. 4) и качестве загрузки (поз. 6), недостаточной загрузке флюса (поз. 5) с подтверждением холодного хода печи по перепаду температур воды в кессонах 1—2 рядов (поз. 7). Значение переменной «степень согласованности процесса» (поз. 2) существенно изменяется и на начальном отрезке времени составляет ~0,3 при средней 0,6, что и сказалось, вероятнее всего, на низком содержании меди в штейне (поз. 3) на предыдущем 4-часовом отрезке времени.

Кроме главного окна, существуют еще несколько других, открыв которые, можно получить полное представление о состоянии процесса на выбранном временном интервале и провести глубокий статистический и профессиональный анализ.

## ВЫВОДЫ

1. ИАСУ ПВ-3 медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»», разработанная компанией «Сумма технологий» на базе платформы G2 фирмы «Gensym» (США) для управления процессом Ванюкова по плавке сульфидного медно-никелевого сырья, позволяет решать задачи стабилизации качества продуктов плавки, получения неизмеряемых или плохо измеряемых параметров технологического процесса, снижения энергоемкости процесса переработки шихты, стабилизации температурного ре-

жима процесса при сохранении плановых заданий и целей производства.

**2.** Создание ИАСУ ПВ-3 на основе синтеза представления знаний в виде семантической сети на базовой онтологии на специфичном ограниченном словаре и мультимодельного описания процесса Ванюкова на основе неявных экспертных знаний в виде аналитических выражений обладает рядом ценных преимуществ по сравнению с другими системами. Во-первых, описание сложной многофакторной модели в виде семантической сети на специфичном ограниченном словаре существенно снижает размерность предметной области без потери семантики и функциональности всех ее элементов. Такой подход является универсальным и не зависит от области применения, т.е. может являться основой для экспертных систем оценивания состояний любых процессов, явлений или объектов. Во-вторых, использование методики извлечения и формализации экспертных знаний в аналитическое выражение позволяет производить свертку разнородной по своей физической природе информации в полиномиальные модели именно для данного процесса, явления или объекта, как это показано на примере процесса Ванюкова и именно для ПВ-3 медного завода компании «ГМК «Норильский никель»».

**3.** В основу управления процессом положена идея организации своевременного опережающего обнаружения и устранения причин возможного перехода СТС из работоспособного состояния в неработоспособное. Выявление таких возникающих «конфликтов», т.е. состояний процесса ПВ за границами «области согласованности», но в пределах «области фактических режимов», по какому-либо из параметров и поиск по моделям нескольких вариантов движения процесса к «области согласованности» и являются главной задачей работы ИАСУ ПВ-3. При этом в режиме реального времени система обнаруживает конфликт на стадии его зарождения, что дает возможность оператору своевременно принять

одно из рекомендуемых разрешений для недопущения его развития.

**4.** Прогнозируемые значения основных критериев с выводом их на монитор являются отражением основных показателей качества работы процесса в целом, а для оператора служат ориентиром, по которому он сверяет возможность выполнения сменного задания по данному показателю и контролирует количественное исполнение принятых им решений.

**5.** Кроме отмеченных выше преимуществ, ИАСУ ПВ-3, реализованная в виде тренажера, обладает еще и свойством обучения операторов единству почерка управления процессом, чего невозможно добиться традиционным изучением основ управления ПВ через существующую систему подготовки операторов-технологов путем передачи опыта наставниками.

**6.** ИАСУ ПВ-3, сданная в промышленную эксплуатацию в мае 2013 г., в настоящее время успешно эксплуатируется на медном заводе ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»».

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Спесивцев А.В.* Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.
2. *Спесивцев А.В., Домшенко Н.Г.* // Сб. тр. XIII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM (Санкт-Петербург, 23—25 июля 2010 г.). СПб.: Изд-во ЛЭТИ, 2010. Т. 2. С. 28.
3. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
4. *Спесивцев А.В., Лазарев В.И., Дайманд И.Н., Негрей Д.С.* // Сб. тр. XV Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM (Санкт-Петербург, 25—27 июня 2012 г.). СПб.: Изд-во ЛЭТИ, 2012. Т. 1. С. 81.
5. *Ванюков А.В., Быстров В.П., Васкевич А.Д.* и др. Плавка в жидкой ванне / Под ред. А.В. Ванюкова. М.: Металлургия, 1988.