

Впервые при освоении горизонтальных и пологопадающих месторождений сформулированы отличительные особенности рабочей зоны карьера, установлены взаимосвязи между параметрами системы разработки, рабочей зоны карьера и его производственной мощностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таран В.А., Брудник С.С., Кофанов Ю.Н. Математические вопросы автоматизации производственных процессов.- М.: Высшая школа, 1968.- 216 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем.- М.: Наука, 1968.-365 с.
3. Новожилов М.Г., Эскин В.С., Корсунский Г.Я. Теория и практика открытой разработки горизонтальных месторождений.- М.: Недра, 1978.- 328 с.
4. Барсуков М.И. Повышение эффективности поточной технологии на карьерах с мягкими породами.- Киев: Наукова думка, 1984.- 232 с.
5. Полищук А.К., Полищук Г.К., Михайлов А.М. Оптимизация развития открытых горных работ.- М.: Недра, 1976.- 159 с.
6. Хохряков В.С., Саканцев Г.Г., Яшкин А.З. Экономико-математическое моделирование и проектирование карьеров.- М.: Недра, 1977.- 200 с.

пост. 20.08.07.

## Экспертная система оценки достоверности экспериментальных данных о свойствах металлургических расплавов

*Ю.М. ЛИХАЧЕВ, Д.Н. ТОГОБИЦКАЯ, А.Ф. ХАМХОТЬКО*

Институт черной металлургии НАН Украины

Предложено построение экспертной системы на основе использования интуитивных знаний Эксперта для оценки экспериментальных данных с использованием средств визуализации, модельных уравнений и свертки информации.

Запропоновано побудову експертної системи на основі використання інтуїтивних знань Експерта для оцінки експериментальних даних з використанням засобів візуалізації, модельних рівнянь і звертки інформації.

The construction is offered of consulting model on the basis of the use of intuitional knowledges of Expert for estimation of experimental data with the use of tools of visualization, model equalizations and packages of information.

В компьютеризации металлургии сейчас доминируют три основных направления. Первое связано с производством продуктов информационного профиля в виде банков и баз данных [1]. Второе связано с созданием фонда моделей, предназначенных для описания различных систем [2-3]. Третье связано с созданием экспертных систем (ЭС) по принятию решений на основе накопленных в системе знаний [4-5]. Процесс интеграции этих направлений, объединенных единой идеологией их создания обеспечит создание элементов интегрированной базы знаний (БЗ).

Экспертная система - программа, которая ведет себя подобно эксперту в некоторой предметной области. Экспертные системы обычно содержат 3 основных модуля:

1) база знаний содержит информацию о конкретной предметной области в виде, удобном для ее использования в решении конкретных задач.

2) механизм запросов позволяет извлекать из базы знаний нужную информацию.

3) интерфейс Пользователя отвечает за бесперебойный обмен информацией между Пользователем и системой.

ЭС предназначены, главным образом, для решения практических задач, возникающих в слабо структурированной и трудно формализуемой предметной области. Для Эксперта источником знаний служат его

предшествующий опыт по решению проблем, книги, известные примеры решения задач. Формализация неформальных знаний, улучшение качества решений, принимаемых Экспертом, автоматизация рутинных аспектов работы пользователя, тиражирование знаний Эксперта-основное направление создания и работы экспертной системы.

Получение экспериментальной и технологической информации в металлургии связано с большими трудозатратами. Зачастую она имеет большой объем, в связи с чем правомерно ее накопление с последующей обработкой. Один из вопросов, связанных с накоплением и хранением данных в базах, является их достоверность. Физико-химические и технологические данные, используемые для получения свойств металлургических расплавов, имеют широкую колеблемость, зашумленность, зачастую и неполноту. В этих условиях, выбор достоверных данных при выполнении прогноза ложиться на Исследователя, с привлечением всего накопленного арсенала знаний. Формализация знаний Исследователя в металлургии расплавов очень трудно поддается описанию, а иногда вообще не представляется возможным выполнить детализацию и структуризацию знаний Эксперта, в виду их интуитивного характера. В связи с этим была принята концепция итерративного режима оценки достоверности данных путем последовательного

уточнения областей на основе прогноза свойств по ранее разработанным моделям и получении новых на исследуемых данных.

С учетом специфики решаемых проблем по оценке достоверности экспериментальных данных о свойствах металлургических расплавов и использование таких данных были сгруппированы в четыре крупных направления.

1) Создание фактографических баз экспериментальных и технологических данных о свойствах металлических и оксидных (в первую очередь - шлаковых) расплавов и результатах их взаимодействия;

2) Создание фонда теоретических и эмпирических моделей, используемых в литературе для описания влияния состава на структуру и свойства этих расплавов;

3) Разработку оригинальных полумпирических моделей структуры многокомпонентных расплавов на базе количественных критериев, характеризующих межатомное взаимодействие в них;

4) Создание интерактивных диалоговых средств комплексного анализа технологической и физико-химической информации, реализующих взаимосвязанные методы оценки достоверности экспериментальных данных и работоспособности моделей разного уровня.

Созданный в ИЧМ банк данных "Металлургия" сконцентрировал большой объем экспериментальных данных в базах: Шлаковые расплавы (8000 составов), Шлакообразующие смеси (300 источников), Железородные материалы (800 составов). Представительный объем данных и широкий диапазон составов, позволил формализовать хранимую структуру в виде информационного ресурса для создания прогнозных моделей (интеллектуальный ресурс).

База фундаментальных физико-химических данных о свойствах шлаковых расплавов ориентирована на удовлетворение информационных нужд теоретической и прикладной металлургии. Паспорт экспериментальных данных состоит из трех блоков, которые полностью характеризуют условия и результаты эксперимента (текстовое описание и числовые характеристики).

Для сохранения логической целостности информационного материала, представленного в виде статей, справочных изданий и неопубликованных экспериментальных данных, обеспечены системные средства ввода и организации данных, содержащих разнотипные по структуре фактографические части, целиком в одну базу (например, в базу "Вязкость" вводится информация о других свойствах - электропроводности, плавкости и т.д.).

Поскольку переработка "информационного сырья" из документально-фактографических БД в проблемно-ориентированную информационную продукцию требует существенной адаптации традиционных СУБД, нами была разработана собственная технология организации и ведения сложно-структурированных баз данных и программно реализована в пакете для операционной системы Windows (программа WinPipe). В настоящее время система работает на сетевом полигоне в отделе физико-химических проблем ИЧМ НАНУ.

Использование поискового аппарата СУБД позволяет решать задачи по созданию прогнозных моделей свойств расплавов. Поэтому одной из приоритетных задач в области информационного обеспечения металлургии расплавов является создание связки Металлурга-Исследователя с поисковым аппаратом СУБД путем

создания надстройки над системными средствами информационного обеспечения.

Такая надстройка включает разработку адаптивных интерфейсов поиска, обработки результатов, стыковки с существующими прогнозными моделями. Создание интерактивных средств последовательного уточнения параметров прогноза за счет интерполяции и экстраполяции разреженных областей исследуемых данных позволит не только повысить достоверность прогноза, но и расширить круг потенциальных пользователей за счет более прозрачных методов обработки информации.

Использование графических средств визуализации данных существенно упрощает их экспертную оценку и повышает интеллектуальный потенциал методов прогноза свойств металлургических расплавов. Представленная в качестве примера прогнозная поверхность, полученная путем сглаживания зашумленных экспериментальных данных, позволяет эксперту оценить качество аппроксимации исходных значений и оценить достоверность влияния параметров на исследуемое свойство.

С целью повышения адаптации разрабатываемой модели прогноза в рамках банка была создана экспертная диалоговая система по принятию решения на основе анализа визуального сравнения различных видов моделей Экспертом-Исследователем. Экспертная система включает построение прогнозных поверхностей в виде полинома в пространстве двух переменных до 8 степени включительно, возможность удаления выбранных точек и визуализацию построенной поверхности на экране дисплея, вращение полученного образа с целью выявления локальных особенностей поверхности.

При наличии огромного объема экспериментальных данных о свойствах металлургических расплавов, проведение новых экспериментальных исследований поглощает все больше средств и дает все более скромные результаты. С другой стороны, общие феноменологические подходы не всегда могут обеспечить достаточно адекватного отражения многообразия конкретных реальных механизмов формирования свойств расплавов и результатов их взаимодействия. В этом плане представляется разумной позиция исследователей, говорящих о целесообразности сосредоточения внимания на разработке полумпирических описательных теорий и концепций.

Для создания упомянутых выше описательных теорий и преодоления затруднений, принципиальное значение имеет разработка физико-химических и термодинамических критериев, позволяющих "свернуть" информацию о составе многокомпонентных систем, снизить параметричность описательных моделей и повысить эффективность математических методов обобщения экспериментальной информации. Привлекательными для металлургических систем с этой точки зрения являются идеи, заложенные в методы определения средней электронной концентрации (Юм-Розери В.), концентрации электронной вакансии (Л.Полинг), структурно-химического моделирования (Ф.Пикеринг). Развитие этих идей и создание на основе их модификаций работоспособных методов анализа и критериев оптимизации представляется обязательной составной частью исследований с целью получения новых результатов путем переработки имеющегося фонда опытных данных.

Весьма перспективным представляется развиваемые в ИЧМ НАНУ методы физико-химического моделирования, сущность которых заключается во вводе в связь между составом и свойствами расплавов промежуточного звена - комплекса интегральных и парциальных параметров межатомного взаимодействия, характеризующих химическое и структурное состояние этих веществ [6]. Исследование связи "состав" - "свойства" при этом расчленяется на две части. Первая сводится к выбору для исследуемых расплавов физико-химической модели, адекватно отражающей особенности их строения и специфику свойств. Вторая связана с установлением корреляций свойств с модельными параметрами и использованием современных математических методов для разработки на базе этих корреляций статистических моделей для прогнозирования свойств многокомпонентных расплавов по результатам изучения относительно простых.

Проблема многомерности при анализе физико-химической (многокомпонентность систем) и технологической (многопараметричность процессов) информации инициирует подключение программ многомерного сравнительного анализа более сложных методов выявления "скрытых" закономерностей - факторного анализа и таксономии [7]. Первый выявляет взаимосвязанные параметры, их взаимное влияние и объединяет в отдельный интегральный фактор. Таксономия - агрегирует данные по их схожести (плавки с одинаковой технологией, сырьевыми условиями, видами чугуна и т.д.). На основе факторного анализа можно выявить параметры, оказывающие влияние на рассматриваемый отклик и определяющие, в этом смысле, технологический резерв для управления с учетом конкретных сырьевых и технологических условий.

На основании этих методов решается задача автоматизированной классификации данных и выявления в размытых "зашумленных" совокупностях скрытых закономерностей, не поддающихся непосредственному измерению и выявлению другими методами. На базе методов многомерного сравнительного анализа (факторного анализа и таксономии) решается задача агрегирования данных за счет уменьшения (сворачивания) размерности пространства признаков (числа варьируемых параметров), или числа наблюдений, с максимальным сохранением информационной мощности исходного массива данных.

Методы многомерного сравнительного анализа сейчас активно используются нами для оценки надежности данных в базах и разработки методов формализованной экспертизы данных [8]. Так, при решении вопроса об оценке достоверности данных различных авторов по построения прогнозных моделей для поверхностного натяжения ( $\sigma$ ), накопленных в базе "Шлак" выявлено расслоение данных на 3 линейных таксонах при их проецировании в координатах  $\sigma \rightarrow$  фактор 1, на который переменная  $\sigma$  дала наибольшую факторную нагрузку обусловленную особенностями химического состава каждой из группы (различие систем, влияние поверхностно-активных добавок и т.п.) (рис.1).

В поисковую систему WinPipe включены средства многомерного проецирования данных и построение трехмерных картограмм для функций отклика, позволяющие выполнять визуализацию данных. Для выявления скрытых закономерностей выполняется просмотр

экспериментальных полей в любых сечениях аргумент - функция. В рамках метода многокритериальной оптимизации предлагаются методы картирования данных в декартовых координатных сечениях X-Y-Z. Выбор координат для построения объемных картограмм имеет принципиальное значение. Оси должны быть независимыми и иметь четкий физический смысл. Так, в случае выбора оптимального шлакового режима для обеспечения заданного качества чугуна, целесообразно выбирать в качестве осей такую композицию компонентов химсостава шлака ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и т.д.), которая бы позволяла учитывать кооперативный характер влияния всех составляющих на закономерности структуры и свойств расплава - вязкости, плавкости и т.п.

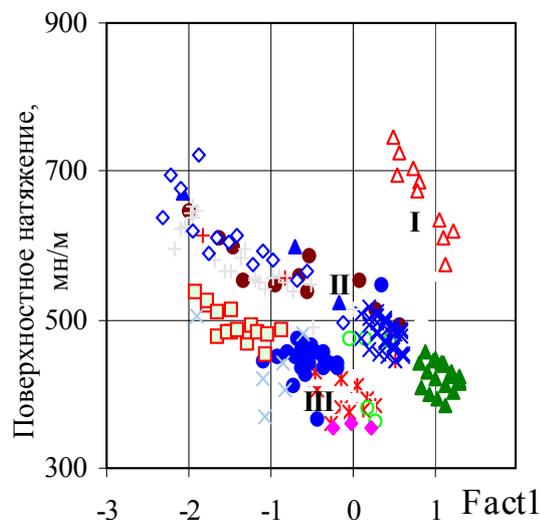


Рис. 1. Проекция данных различных авторов о поверхностном натяжении на фактор с наибольшей нагрузкой (I - железосиликатные шлаки, II - сталеплавильные и доменные шлаки, III - синтетические шлаки).

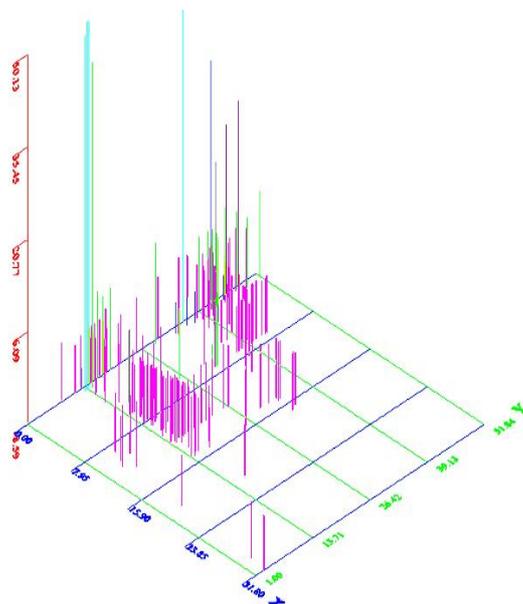
Равномерность, густая сеть покрытия всего поля - основное требование к опытным данным. В случае наличия "выбросов" по координатным осям исходные данные подвергаются дополнительным сортировкам согласно указанным пороговым значениям.

Получаемая экспериментальная точечная поверхность аппроксимируется полиномом степени 1-8 и картируется линиями равного уровня отклика на печать и на экран дисплея в виде геометрического места точек, помеченных символами цвета на экране. Картограмма обрамляется шкалами для координатных осей и численной расшифровки всех используемых символов и цветов. Трехмерные картограммы по сравнению с традиционными методами математического моделирования имеют одно из неоспоримых преимуществ - наглядность представления сложных нелинейных зависимостей. Если двигаться по топографическим линиям равных значений на поверхности "отклика", легко указать интервалы для исследуемых параметров, являющихся наиболее рациональными в данных условиях работы агрегата, обеспечивающий заданный уровень свойств.

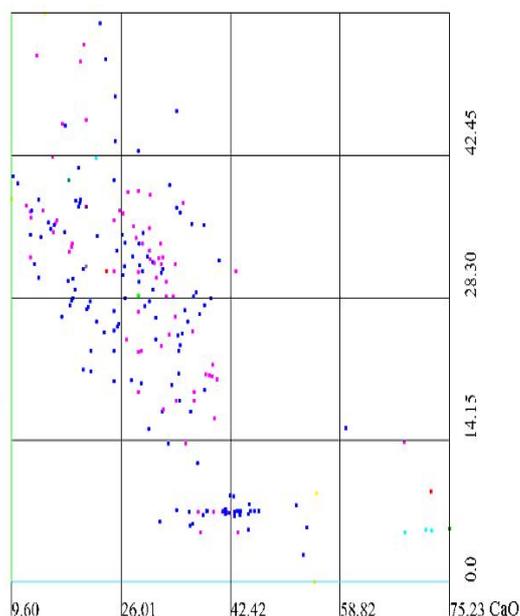
Проецирование данных на оси  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  (рис. 2, а) позволяет определить изученность системы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -

SiO<sub>2</sub>-CaO-TiO<sub>2</sub>, изменение состава (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) и свойств (Вязкость при 1500°), равномерность покрытия исследуемой области. Аппроксимация прогнозной поверхности полиномом 2 степени (рис. 2, в) и полиномом 8 степени (рис. 2, г) позволяет детализировать разбиение

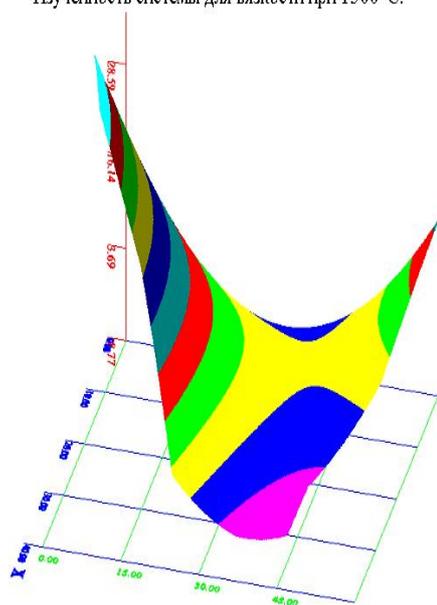
исследуемой области на подобласти изменения составов в зависимости от степени аппроксимации поверхности отклика. Анализ проекции вязкости на плоскость (рис. 2, б) позволяет детализировать равномерность покрытия исследуемой области по составу CaO-TiO<sub>2</sub>.



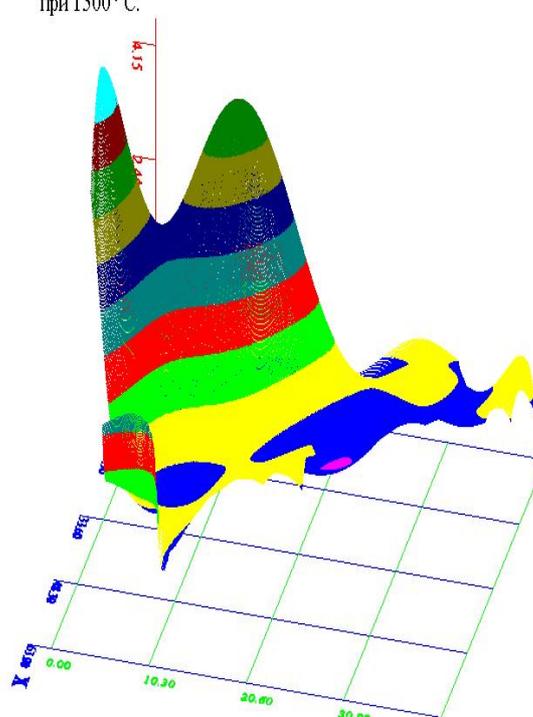
а) Титанистые шлаки-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-TiO<sub>2</sub>. Изученность системы для вязкости при 1500°С.



б) Титанистые шлаки. Проекция на плоскость вязкости при 1500° С.



в) Титанистые шлаки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-TiO<sub>2</sub>. Ось X – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ось Y- SiO<sub>2</sub>, Z – Вязкость при 1500°. Поверхность отклика 2 порядка



г) Титанистые шлаки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-TiO<sub>2</sub>. Ось X – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ось Y- SiO<sub>2</sub>, Z – Вязкость при 1500°. Поверхность отклика 8 порядка

Рис. 2. Титанистые шлаки

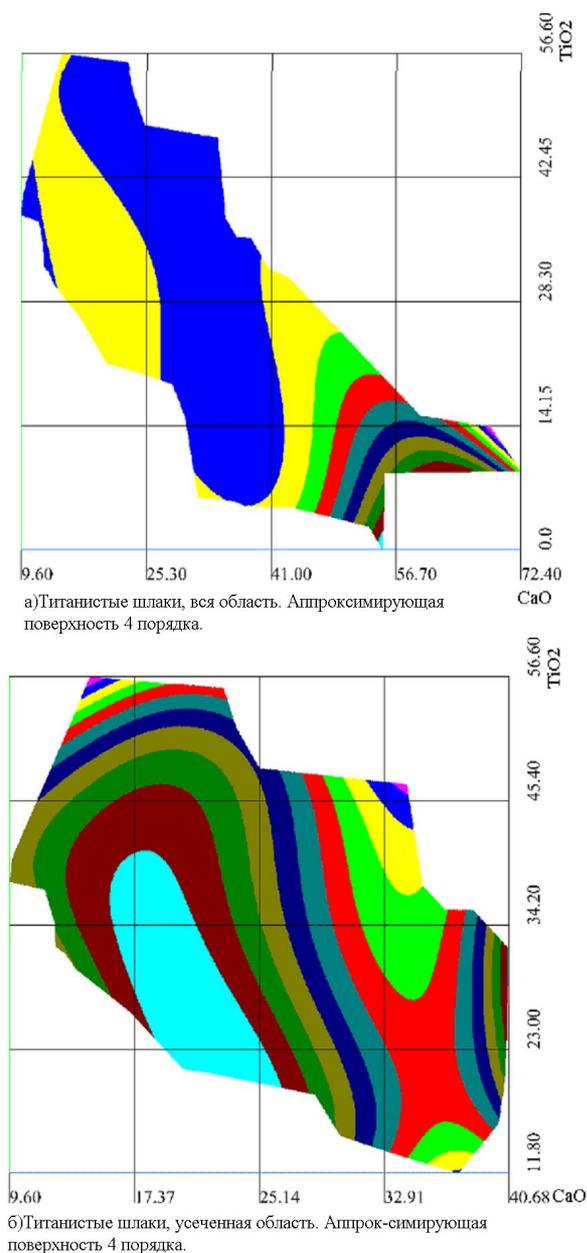


Рис. 3. Аппроксимирующие поверхности

Рассматривая области (Рис. 2, б. CaO-TiO<sub>2</sub>) можно различить характерные подобласти (Рис. 3 :  $9.6 \leq \text{CaO} \leq$

$42.5$  и  $14 < \text{TiO}_2 < 56$  ;  $28 \leq \text{CaO} \leq 75$  и  $0 < \text{TiO}_2 < 12$ ) с наибольшей концентрацией свойств. Таким образом наиболее достоверное выполнение прогноза (построение функции отклика) необходимо выполнять на таких областях. Построение функции отклика 4 порядка для всей исследуемой области (рис. 3, а) и для подобласти (рис. 3, б) позволяет выполнять более детальный прогноз с учетом дифференциации исследуемой области составов и соответствующих свойств металлургических расплавов.

### Выводы

Использование методов компьютерной графики в сочетании с аналитическими процедурами свертки химического состава многокомпонентных систем, а также накопленного представительного фонда экспериментальных данных обеспечивает экспертную оценку достоверности, корректность разработанных моделей, степень изученности системы, а также построение прогнозных моделей для практического использования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Базы физико-химических и технологических данных для создания информационных технологий в металлургии. //Металлургическая и горнорудная промышленность. 1999. №3. с.17-21.
2. Приходько Э.В., Белькова А.И. Физико-химические критерии для оценки влияния микронеоднородности структуры оксидных расплавов на их свойства. //Теория и практика металлургии. Днепропетровск. -№3. -1998. -с.25-28.
3. Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Варивода О.И. Моделирование на ЭВМ свойств оксидных систем. //Известия вузов. Черная металлургия. -1991. -№12. -с. 41-45.
4. Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Белькова А.И., Лихачев Ю.М. От баз данных к базам знаний о свойствах металлургических шлаков. //Сб.н.т. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». –Днепропетровск. –Вып.9. -2004. –С.168-175.
5. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Методология создания базы знаний о свойствах сталей и сплавов // Металлознавство та обробка металів. Киев. 1996. №3. с.50-55.
6. Приходько Э.В.Металлохимия многокомпонентных систем. -М,Металлургия.-1995.-320 с.
7. Иберла К. Факторный анализ. Пер. с нем. В.М.Ивановой. -М. Статистика. -1980. -399 с.
8. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. – М.Сов.Радио. - 1972.-206 с.

пост. 20.08.07.