

УДК 66.0:004.04

**ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

*канд. техн. наук А.В. СПИРИДОНОВ; канд. хим. наук С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет);
д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ
(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск)*

Рассмотрена возможность управления химико-технологическим процессом методами активного эксперимента. Для управления реальным технологическим процессом предлагается использовать методы распознавания образов в виде нелинейного и кусочно-линейного решающего правил. Приведен пример применения такого подхода для разделения сложных классов, которые не удается разделить при помощи линейной дискриминантной функции.

Введение. Анализируя поток информации, связанный с управлением технологическими процессами, следует признать, что методы активного эксперимента вне лабораторных исследований не привели и, очевидно, не могут привести к получению положительного результата. С одной стороны, это связано с невозможностью поддержания исследуемых параметров на постоянном уровне, а с другой – с трудностями производства провести эксперимент в промышленном масштабе. Потери в случае неудачи такого активного эксперимента могут быть несопоставимы с будущим результатом.

Существует целый ряд производственных процессов, особенностью которых является использование исходного химического сырья с переменным составом. В первую очередь речь идет о природном химическом сырье, состав которого непрерывно изменяется и не поддается прогнозу. Так, на Лебединском и Михайловских карьерах содержание железа в рудном массиве колеблется от 45 до 67 %, на расстоянии 6...8 метров по фронту содержание железа изменяется на 5 и более процентов. Изменчивость руд цветных металлов наблюдается в еще большей степени [1]. На производстве единственным в настоящее время используемым способом для управления составом является усреднение. Поэтому, например, в условиях переработки природного сырья необходимы большие площади под соответствующие помещения, а также определенные ресурсы – электроэнергия, заработная плата персонала и т.п.

Основная часть. Функции существующих автоматизированных систем управления технологическим процессом заключаются в стабилизации параметров первичных технологических контуров. Решение о настройке должен принять технологический персонал. Достаточно давно известным решением о поддержке технологического процесса при неопределенности изменения входных параметров является применение симплексного метода управления [2], однако данный метод широкого применения не нашел, очевидно, вследствие заикливания процесса и необходимости непрерывного изменения шага процесса с соответствующим отскоком, пороговой фильтрацией помех, адаптацией числа отражаемых вершин.

В то же время в информационных технологиях давно уже известен подход, который носит общее название – **распознавание образов** [3]. Распознавание образов в широком смысле трактуется как методы классификации и идентификации предметов, явлений, процессов, сигналов, ситуаций, объектов, которые характеризуются конечным набором некоторых свойств и признаков [3].

Для решения проблем прогнозирования показателей качества и эффективности технологических процессов можно использовать **теорию распознавания образов**. Основная задача распознавания образов заключается в том, чтобы исходя из обучающей последовательности определить класс, к которому принадлежит описание объекта, подвергаемого классификации или идентификации. К такой схеме приводится любая задача принятия решений, если только принятие решений базируется на изучении ранее накопленного опыта (обучение с учителем).

Реализация методов распознавания необходима в автоматизированных системах. Такое применение теории распознавания, как кластерный анализ (таксономия), выявление закономерностей во множестве экспериментальных данных, прогнозирование различных процессов или явлений, широко используется в научных исследованиях.

Известно, что все факторы технологического процесса делятся на неуправляемые (случайные) и управляемые. Как правило, случайные факторы – это характеристики исходного природного сырья. Выходные показатели – качество продукта (определяется соотношением первых двух видов факторов). В данном случае метод распознавания образов заключается в том, что собирается подробный статистический материал о процессе, а все выходные показатели делятся на два класса – удовлетворительное и неудовлетворительное качество. После соответствующей обработки собранного материала получают так

называемое решающее правило (см. например, ГОСТ Р 8.731-2010 ГСИ; ГОСТ 24297-87), под которым понимают указание или совокупность указаний, предназначенных для принятия решения относительно приемки партии продукции по результатам контроля. Особенность решающих правил заключается в том, что последовательность выполнения действий определяют путем применения относительно простых процедур над исходными данными.

Если решающее правило включает в себя только неуправляемые (случайные) параметры – показатели качества природного сырья, решающее правило обладает только предсказывающим действием. Следовательно, на основании показателей качества сырья можно будет с достаточно высокой вероятностью предсказать результаты реализации процесса, т.е. удовлетворительно или неудовлетворительно будет протекать процесс при заданных управляющих факторах.

Однако решающее правило можно трактовать и более широко. Если решающее правило включает неуправляемые (случайные) факторы (показатели качества природного сырья) и управляющие, решающее правило обладает способностью выбирать режимы, позволяющие перейти в область удовлетворительного протекания процесса.

Полученное решающее правило подлежит верификации. Оно, как и предыдущие действия, не требует больших материальных затрат. Достоинством метода является также постоянное накопление данных и непрерывная корректировка решающего правила, что приводит к адаптации данного способа управления. Схема проведения соответствующего эксперимента приведена на рисунке 1.

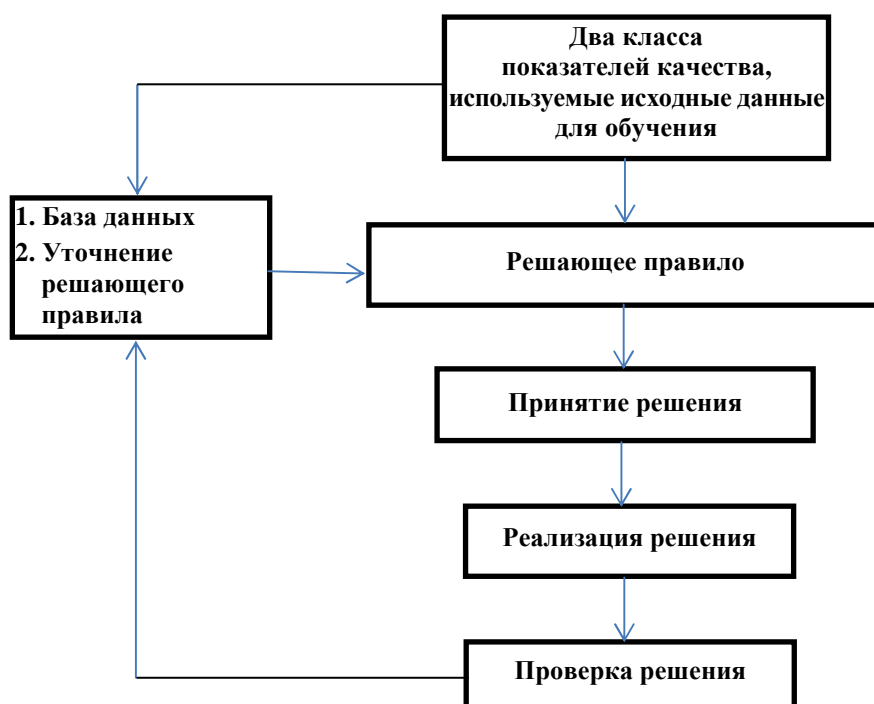


Рис. 1. Схема поддержки управления технологическим процессом методом распознавания образов

Сравнение симплексных методов и методов распознавания образов показало, что при запросе в поисковике GOOGLE на фразу «управление качеством распознавание образов» найдено 236 000 ссылок, а на фразу «управление качеством симплексные методы» всего лишь 10 000. Примерно такое же соотношение найдено в поисковой системе BING.

Следует также признать, что эволюционное планирование эксперимента – метод экспериментальной оптимизации, сочетающий многократное использование дробных и полных факторных планов с движением по градиенту функции отклика и предназначенный для совершенствования производственных объектов (ГОСТ 24026-80), также не нашел своего практического применения. Количество ссылок в GOOGLE – 64 000.

В настоящее время в технической кибернетике особое место занимает теория распознавания образов. Существует множество алгоритмов распознавания образов:

- *детерминистические* – построение решающих правил, метод построения эталонов, метод дробящихся эталонов, линейные решающие правила, метод ближайших соседей, метод потенциальных функций,

структурные (лингвистические) методы, кластерный анализ, критерии информативности и отбор информативных признаков;

- *статистические* – метод k_n ближайших соседей (правило ближайшего соседа), параметрическое оценивание распределений, метод максимума правдоподобия, случай статистически независимых признаков, распознавание при неизвестных априорных вероятностях образов, минимаксный критерий, критерий Неймана – Пирсона, последовательные процедуры распознавания, аппроксимационный метод оценки распределений по выборке, таксономия, оценка информативности признаков, иерархические системы распознавания.

Очевидно, что при наличии большого количества переменных и сложного вида поверхности раздела поиск решающего правила затруднен. В настоящее время существует достаточно большое количество статистических программ, в которых имеются соответствующие вкладки, реализующие соответствующие алгоритмы распознавания (дискриминации). Не следует, однако, думать, что методы распознавания образов способны решить любые проблемы, связанные с управлением качеством технологического процесса. Основной проблемой для данной методики является поиск факторов, которые влияют на процесс и поиск «хорошего алгоритма» для построения решающего правила.

По литературным данным, количество относительно эффективных алгоритмов составляет несколько десятков, а это свидетельствует о том, что проблема окончательно не решена. Чаще всего основная трудность связана с поиском решающего правила, удовлетворительно описывающего обучающую выборку. Большинство пакетов, которые реализуют вывод решающего правила, предлагают использовать линейную дискриминационную функцию. В случае получения отрицательного результата исследователь отказывается от дальнейшей работы. Однако проблема чаще всего решается при переходе к нелинейному решающему правилу.

Результаты работы. Для иллюстраций трудностей, связанных со сложностями получения решающего правила, приведем *пример*.

Как уже было отмечено выше, наибольшие сложности в получении решающего правила связаны с классификацией обучающей выборки на два класса, имеющих сложную поверхность раздела.

Выбор исходного описания объектов является одной из центральных задач проблемы теории распознавания образов. При удачном выборе исходного описания (пространства признаков) задача распознавания может оказаться правильной, а неудачно выбранное исходное описание может привести к сложной дальнейшей переработке информации или к отсутствию решения.

Результаты получения решающего правила для достаточно сложных поверхностей, разделяющих два класса, представлены на рисунках 2 и 3, где показаны результаты распознавания двух классов – переменные Col_1 и Col_2. Процесс распознавания контролируется переменной Col_3.

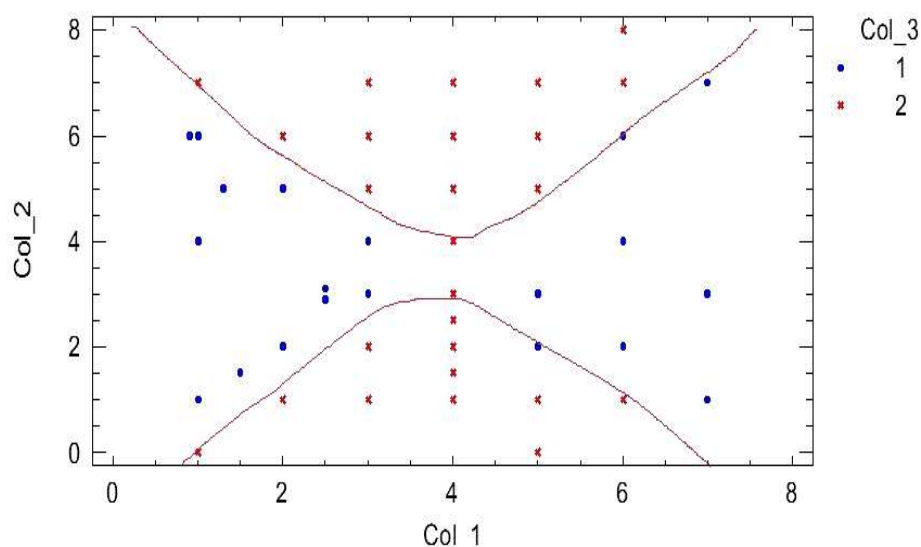


Рис. 2. Два класса, используемые для обучения, имеющие гиперболическую границу раздела

Изначально были использованы линейные решающие правила, основанные на расстоянии между объектами – точками признакового пространства (Евклидово расстояние, расстояние по Манхэттену, Чебышевское расстояние и др.), метод эталона. Очевидно, что линейное разделяющее правило не подхо-

дит для удовлетворительного решения данной задачи (табл. 1). Процент корректных результатов колеблется от 54 до 58.

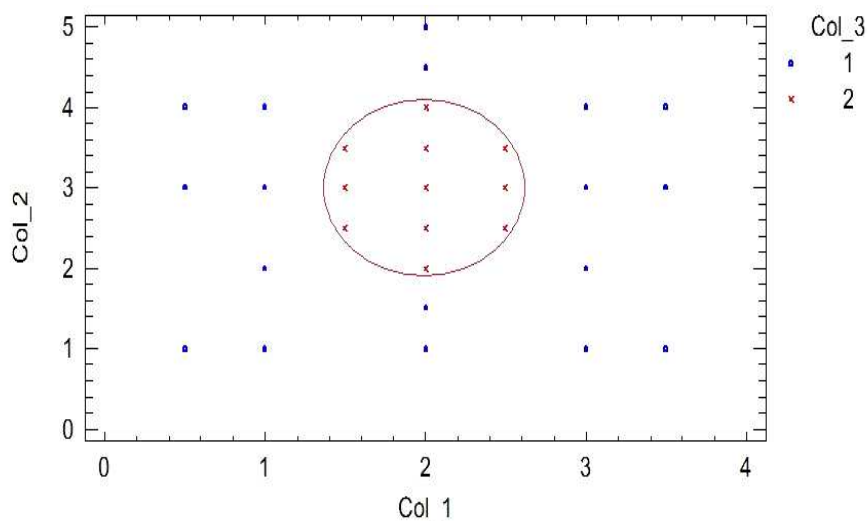


Рис. 3. Два класса, используемые для обучения, имеющие сферическую границу раздела

Таблица 1

Разделение двух классов при помощи линейного решающего правила

Линейное решающее правило (пример 1)				Линейное решающее правило (пример 2)			
Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2	Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2
1	20	13 (65 %)	7 (35 %)	1	18	8 (44 %)	10 (56 %)
2	26	12 (46 %)	14 (54 %)	2	11	4 (36 %)	7 (64 %)

В данном случае проблема решается достаточно просто. Необходимо перейти к нелинейным решающим правилам и тогда результаты резко улучшаются (табл. 2).

Таблица 2

Разделение двух классов при помощи нелинейного решающего правила

Нелинейное решающее правило (пример 1)				Нелинейное решающее правило (пример 2)			
Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2	Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2
1	20	19 (95 %)	1 (5 %)	1	18	15 (83 %)	3 (17 %)
2	26	1 (4 %)	25 (96 %)	2	11	0 (0 %)	11 (100 %)

Очевидно, что доля корректных результатов составляет 92...94 %. Использование адаптивных методов разделяющих границ в ряде практических задач является наиболее предпочтительным и возможным. Они позволяют организовать последовательный алгоритм уточнения коэффициентов, по мере поступления информации, и незаменимы в условиях нестационарности исследуемого процесса. В основу положен Байесовский подход, исходящий из статистической природы наблюдений [4].

За основу берется предположение о существовании вероятностной меры на пространстве образов, которая либо известна, либо может быть оценена. Цель состоит в разработке такого классификатора, который будет правильно определять наиболее вероятный класс для пробного образа. Тогда задача состоит в определении «наиболее вероятного» класса. На основе этих данных необходимо построить байесовский классификатор:

$$g_i(x) = \ln(P(\Omega_i | x)) = -\frac{x - \mu_i}{\Sigma_i} (x - \mu_i)^T + \ln P(\Omega_i) - \frac{l}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i|,$$

где $P(\Omega_i | x)$ называется апостериорной вероятностью, поскольку задает распределение индекса класса после эксперимента (a posteriori, т.е. после того, как значение вектора признаков x было получено); μ_i – математическое ожидание случайной величины x в классе Ω_i ; Σ_i – матрица ковариации размерности $l \times l$ для класса Ω_i ; $|\Sigma_i|$ – определитель матрицы ковариации.

Байесовский классификатор является квадратичным классификатором. Эта функция представляет собой квадратичную форму. Следовательно, разделяющая поверхность $g(x)$ является гиперповерхностью второго порядка.

$$g_1(x) - g_2(x) = 0.$$

Подставив ряд значений в эти формулы можно получить уравнения описывающие поверхности второго порядка (окружность или эллипс, гиперболу и др.).

Пример

$$\text{Пусть } P\Omega_1 = P\Omega_2, \mu_1 = (0,0), \mu_2 = (0,0), \Sigma_1 = \begin{pmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,15 \end{pmatrix}, \Sigma_2 = \begin{pmatrix} 0,15 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix},$$

подставив эти значения в формулу Байеса, получим уравнение гиперболы:

$$(x_1 + 2)^2 - x_2^2 = 6.$$

Еще одним приемом, позволяющим улучшить качество разделения, является использование решающего правила в виде кусочно-линейных функций. Так, отобрав неверно классифицированные объекты с результатом 52 % и повторив процедуру вновь, получим уже 71 % правильно распознанных объектов. Повторяя эту процедуру дальше, можно достигнуть примерно такого же результата, как и при использовании нелинейной функции.

Таким образом, исходя из всего изложенного можно сделать **вывод** о том, что использование нелинейного решающего правила или кусочно-линейных функций позволяет решить достаточно сложные задачи, возникающие при управлении химико-технологическими процессами в условиях неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарайский, В.Н., Усреднение руд / Зарайский, В.Н., Николаев К.П. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
2. Растрингин, Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растрингин. – Рига: Зинанте, 1981. – 375 с.
3. Фомин, Я.А. Распознавание образов: теория и применения / Я.А. Фомин. – 2-е изд. – М.: ФАЗИС, 2012. – 429 с.
4. Местецкий, Л.М. Математические методы распознавания образов: курс лекций / Л.М. Местецкий. – М.: МГУ, 2004. – С. 8–15.

Поступила 22.01.2015

ASSISTANCE TO THE MANAGEMENT OF CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESS UNDER UNCERTAINTY

A. SPIRIDONOV, S. JAKUBOWSKI, M. ZILBERGLEIT

The possibility of control of chemical and technological process by methods of active experiment is considered. In order to control the real technological process use of the methods of recognition in the form of non-linear and piecewise linear decision rule is proposed. An example of such an approach for the separation of complex classes, which cannot be separated by a linear discriminant function, is given.