

УДК 681.518.3

## ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ДЛЯ АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА

А.Г. Шумихин, И.А. Вялых

Пермский государственный технический университет

E-mail: atp@pstu.ru

Исследовано применение алгоритма автоматической классификации отдельных переменных технологического процесса во всем спектре их фактических значений методом динамических сгущений. Представлены результаты нечеткой классификации измерительной информации о значениях технологических параметров при априори заданном числе классов, с выделением координат центров классов и автоматическим построением функций принадлежности четких значений этих переменных к соответствующим классам на примере технологического процесса каталитического крекинга, свидетельствующие о целесообразности применения рассмотренного метода.

### Ключевые слова:

Каталитический крекинг, технологический процесс, автоматическая классификация переменных, нечеткая логика, нечеткое управление.

### Key words:

Catalytic cracking technological process, automatic classification process variable, fuzzy logic, fuzzy control.

Каталитический крекинг – процесс расщепления нефтяных фракций при высоких температурах (480...510 °С) в присутствии цеолитсодержащего катализатора. Процесс характеризуется большим количеством одновременно протекающих химических реакций крекинга, многочисленными перекрестными связями между сырьем, катализатором и воздухом, подаваемым на регенерацию, по тепловым и материальным потокам и рециркуляцией регенерируемого катализатора. В связи с этим разработка адекватной математической модели реакторного блока и регенератора представляет собой сложную задачу. Так для описания процесса каталитического крекинга на промышленной установке 43-102/М предложено использовать «связанную» математическую модель реактора и регенератора [1].

При автоматизации управления процессом, протекающим в установке каталитического крекинга, могут быть использованы знания и опыт оперативного технологического персонала по управлению установкой. При формализации экспертных знаний, например с применением процедур логического вывода, появляется возможность автоматизации принятых решений по корректровке технологического режима.

Основная задача, которую решает оператор-технолог при управлении технологическим процессом, – это идентификация технологической ситуации, то есть сравнение текущего состояния режима установки с имевшими в его практике место прецедентами, отнесение состояния к одному из них с качественной оценкой степени принадлежности состояния к этому прецеденту и, с учетом результата сравнения, применение соответствующего управления.

Информация, полученная при интервьюировании экспертов – персонала установки каталитического крекинга, показывает, что изменение пара-

метров технологического режима функционирования реакторного блока вызывают две основные причины (рис. 1). Первая из них – изменение фракционного состава сырья на входе в реактор, ведущее к изменению количества кокса, откладывающегося на катализаторе. В результате изменяется температура катализатора после регенератора и, как следствие, температура катализатора на входе в реактор, что ведет к изменению параметров процесса крекинга. Вторая причина – изменение температуры окружающего воздуха, забираемого для осуществления процесса регенерации. При этом изменяется плотность воздуха и его массовый расход на входе регенератора, что вызывает изменение режима процесса регенерации.

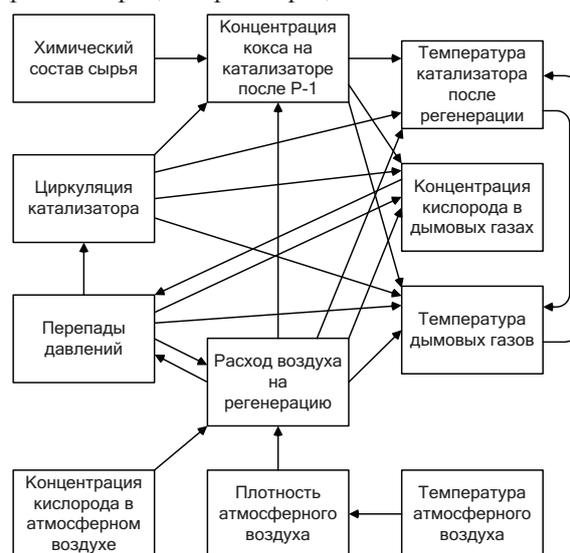


Рис. 1. Взаимосвязь основных параметров процесса в реакторно-регенераторном блоке

Изменение температуры сырья на входе и газопродуктовой смеси на выходе реактора – процессы инерционные. Поэтому оператор, основываясь на

косвенных признаках – изменении значения давления газо-сырьевой смеси на входе в реактор и температуры газо-продуктовой смеси на выходе реактора, своевременно принимает решение по неалгоритмизированным правилам об изменении температуры газо-сырьевой смеси перед реактором, стабилизируя температуру газо-продуктовой смеси на выходе реактора.

Задачей управления процессом функционирования регенераторного блока является максимально возможное, в рамках ограничений на переменные состояния процесса и управляющие воздействия, удаление кокса при регенерации.

В настоящее время на действующей установке каталитического крекинга управление работой регенераторного блока осуществляется оператором-технологом практически вручную, путем коррекции уставок (заданий) следящих систем автоматической стабилизации технологических параметров: расхода технологического пара в реактор, общего расхода воздуха и расхода технологического пара в регенератор, расхода технологического пара и воздуха в дозатор для обеспечения циркуляции катализатора, а также дистанционного ручного управления положением задвижек на входе и выходе верхней и нижней зон регенератора. Поэтому автоматизация принятия решения по управлению процессом регенерации с целью максимально возможного удаления кокса с катализатора в регенераторе является актуальной задачей.

Регенератор и реактор установки расположены соосно: сверху реактор, внизу регенератор. Основными показателями, характеризующими работу регенераторного блока, являются температура дымовых газов на выходе аппарата и концентрация кислорода в дымовых газах. Регенератор имеет три зоны (рис. 2).

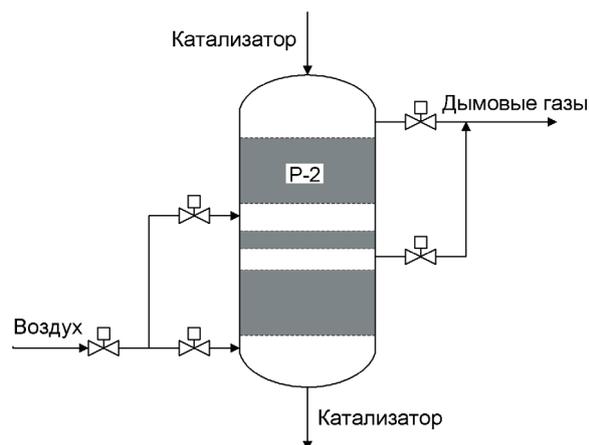


Рис. 2. Схема регенератора установки каталитического крекинга

В нижнюю и верхнюю зоны для выжигания кокса подается воздух. Процесс регенерации катализатора в этих зонах протекает в кинетической и диффузионной областях. После регенерации смесь

дымовых газов из нижней и верхней зон отводится по трубопроводам. Средняя зона служит для предотвращения контакта свежего воздуха с дымовыми газами, содержащими CO, и тем самым, окисления его до CO<sub>2</sub> с выделением значительного количества тепла, что может привести к спеканию катализатора, а также к разрушению дымовых трубопроводов.

Общий расход воздуха на регенерацию стабилизируется автоматической системой. Для распределения воздуха между первой и третьей зонами на их входе и выходе предусмотрены задвижки с ручным дистанционным управлением. Управляя положением одной из задвижек, оператор, исходя из значений давлений на входе и выходе зон, осуществляет перераспределение расхода воздуха по зонам. При этом происходит изменение значений давлений в зонах, на которые накладываются следующие ограничения:

- давление на входе в нижнюю зону регенератора должно находиться в диапазоне  $(3,15...3,23) \cdot 10^{-2}$  МПа. При большем давлении возможно подвигание катализатора в нижней зоне, при меньшем – подвигание катализатора в трубопроводе между регенератором и дозором пневмотранспорта;
- перепад давления на средней зоне, между входом верхней и выходом нижней зоны должен поддерживаться около  $1 \cdot 10^{-3}$  МПа. При большем значении увеличивается расход дымовых газов в верхнюю зону, что снижает эффективность регенерации, при меньшем значении возможно попадание свежего воздуха в дымовые газы нижней зоны, что ведет к началу дожига CO в CO<sub>2</sub>, сопровождающегося резким повышением температуры газа.

Эти давления, а соответственно и расходы, регулируются операторами вручную при помощи четырех задвижек и изменением значения уставки регулятора общего расхода воздуха в регенератор. Изменение одного из параметров ведет к изменению всех остальных, что может привести к отклонению от регламентного режима работы установки, увеличению расхода дорогостоящего катализатора, меньшему выходу целевого продукта, т. е. к отрицательным экономическим последствиям.

При управлении оперативный персонал установки пользуется своим опытом эксплуатации реактора-регенератора. Так как значения температуры дымовых газов и некоторых зон катализатора в регенераторе могут изменяться с высокой скоростью (до 20 °С в минуту), то требуется своевременная и безошибочная реакция оператора. Поэтому в алгоритме управления реакторным блоком целесообразно использовать формализованный опыт работы персонала промышленной установки каталитического крекинга.

Проведенный с целью формализации экспертных знаний опрос технологического персонала позволил выявить основные параметры, по которым

можно оценивать ход технологического процесса, и параметры, целенаправленно изменяя которые, можно управлять процессом. Полученные экспертные оценки можно использовать для выделения нечетких множеств – лингвистических термов, выбора вида соответствующих им функций принадлежности и формулирования правил логического вывода нечеткой продукционной модели. Однако построенная на основании экспертных оценок модель в значительной степени носит отпечаток субъективности, так как в противоречивых «высказываниях» операторов-экспертов отражается их личностные характеристики (опыт работы, предпочтения и др.).

Поэтому для построения нечеткой продукционной модели рассматривается другой подход, основанный на использовании трендов контролируемых переменных технологического процесса в различных режимах работы установки, которые в совокупности создают объективный образ этих режимов, учитывающий, вероятно, даже и особенности ведения технологического процесса разными операторами-технологами. Подход основан на автоматической классификации отдельных переменных во всем спектре их фактических значений методом динамических сгущений [1] с алгоритмом нечеткой классификации при априори заданном числе классов, с выделением координат центров классов и автоматическим построением функций принадлежности четких значений этих переменных к соответствующим классам [2, 3]. Выбор числа классов по каждой переменной определяется количеством лингвистических термов, предполагаемых для использования в нечеткой продукционной модели.

Последовательность отнесения  $i$ -го наблюдения ( $x_{ij}$  каждого  $j$ -го) технологического параметра к  $l$ -му классу и определения координат классов ( $i=\overline{1, n}$ ;  $l=\overline{1, k}$ , где  $n$  – количество наблюдений,  $k$  – количество классов) состоит в следующем. Для нечеткой классификации технологических параметров  $\vec{x} \in X$  установки каталитического крекинга используется алгоритм, приведенный в [3]. В начале обучения алгоритма, в пространстве технологических параметров, априори задаются координаты центров классов  $V_j^\ell (j=\overline{1, m}; \ell=\overline{1, k})$ . По значениям параметров  $x_{ij} \in X (i=\overline{1, n}; j=\overline{1, m})$ , ранжированных по возрастанию значений, рассчитываются значения их мер принадлежности  $\mu_{ij}^\ell(x)$ , ( $x=x_{ij} \in X; i=\overline{1, n}; j=\overline{1, m}; \ell=\overline{1, k}$ ) к каждому из  $k$  классов:

$$\mu_{ij}^\ell(x) = \frac{1/\|x_{ij} - V_j^\ell\|^2}{\sum_{c=1}^k (1/\|x_{ij} - V_j^c\|^2)}, \text{ при } x_{ij} \neq V_j^\ell;$$

$$\ell = \overline{1, k}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m},$$

где  $\vec{V}_j = \{V_j^1, \dots, V_j^k\}$  – вектор координат центров классов  $j$ -го технологического параметра.

При этом:

если  $l = 1$  и  $x_{ij} \leq V_j^1$ , то  $\mu_{ij}^1(x) = 1$ ;

если  $l \neq 1$  и  $x_{ij} \leq V_j^1$ , то  $\mu_{ij}^l(x) = 0$ ;

если  $1 < l < k$  и  $V_j^{l-1} < x_{ij} < V_j^{l+1}$ ,

$$\text{то } \mu_{ij}^\ell(x) = \frac{1/\|x_{ij} - V_j^\ell\|^2}{\sum_{c=1}^k (1/\|x_{ij} - V_j^c\|^2)};$$

если  $1 < l < k$  и  $x_{ij} < V_j^{l-1}$

или  $V_j^{l+1} < x_{ij}$ , то  $\mu_{ij}^\ell(x) = 0$ ;

если  $l = k$  и  $V_j^l < x_{ij}$ , то  $\mu_{ij}^l(x) = 1$ ;

если  $l \neq k$  и  $V_j^l < x_{ij}$ , то  $\mu_{ij}^l(x) = 0$ .

По полученным значениям функций принадлежности уточняются значения координат центров классов

$$V_j^\ell = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{ij}^\ell(x))^2 x_{ij}}{\sum_{i=1}^n (\mu_{ij}^\ell(x))^2}, \ell = \overline{1, k}; j = \overline{1, m}$$

и с найденными значениями  $V_j^\ell$  рассчитываются вновь значения функций принадлежности  $\mu_{ij}^\ell$ , ( $i=\overline{1, n}; j=\overline{1, m}; \ell=\overline{1, k}$ ).

Процедура продолжается до выполнения условия

$$\delta = \max\{|\mu_{ijr}^\ell(x) - \mu_{ij(r-1)}^\ell(x)|\} < \varepsilon,$$

$$\forall i = \overline{1, n}; \forall j = \overline{1, m}; \forall \ell = \overline{1, k},$$

где  $\delta$  и  $\varepsilon$  – текущая и заданная погрешности соответственно.

Рассмотрим результаты применения этого алгоритма для идентификации нечеткой моделью наблюдений основных показателей технологического процесса, протекающего в регенераторе катализатора установки каталитического крекинга, схема которого представлена на рис. 2.

На рис. 3–5 приведены «исторические» данные об изменении значений технологических параметров, используемых при управлении процессом регенерации.

По этим данным были получены функции принадлежности к лингвистическим термам СНН – существенно ниже нормы; НН – ниже нормы; Н – норма; ВН – выше нормы; СВН – существенно выше нормы, каждой выходной переменной координаты технологического процесса (рис. 6–8).

Для каждой переменной было взято пять термов, что позволяет контролировать как незначительные, так и значительные отклонения от нормального режима функционирования и формировать в соответствии с алгоритмом пропорциональное управление положением задвижек на входе и выходе верхней и нижней зон регенератора. При увеличении количества термов, растет число логических правил, что увеличивает вероятность ошибок

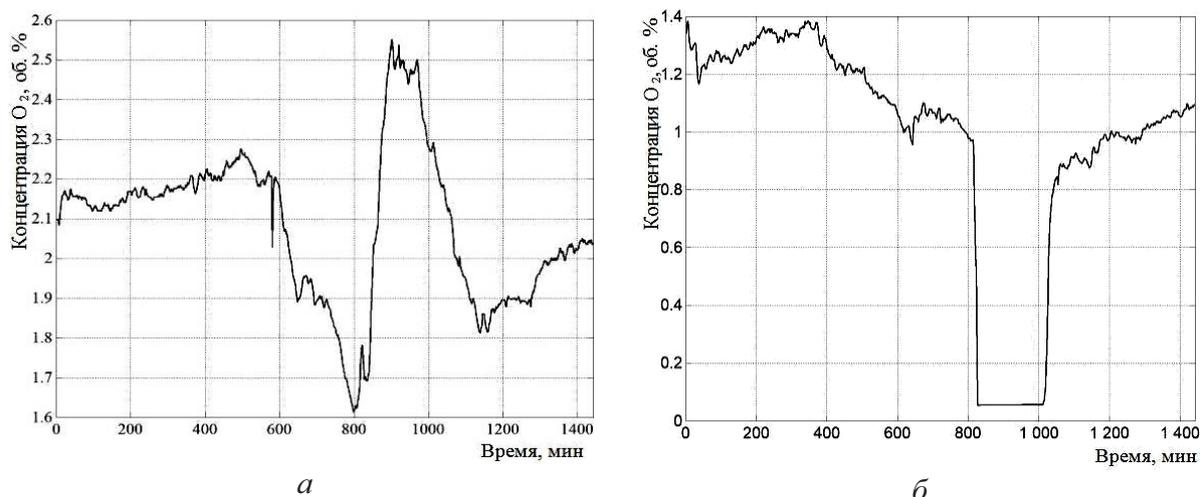


Рис. 3. Изменение концентрации кислорода в дымовых газах Р-2 за сутки для: а) верхней; б) нижней зоны

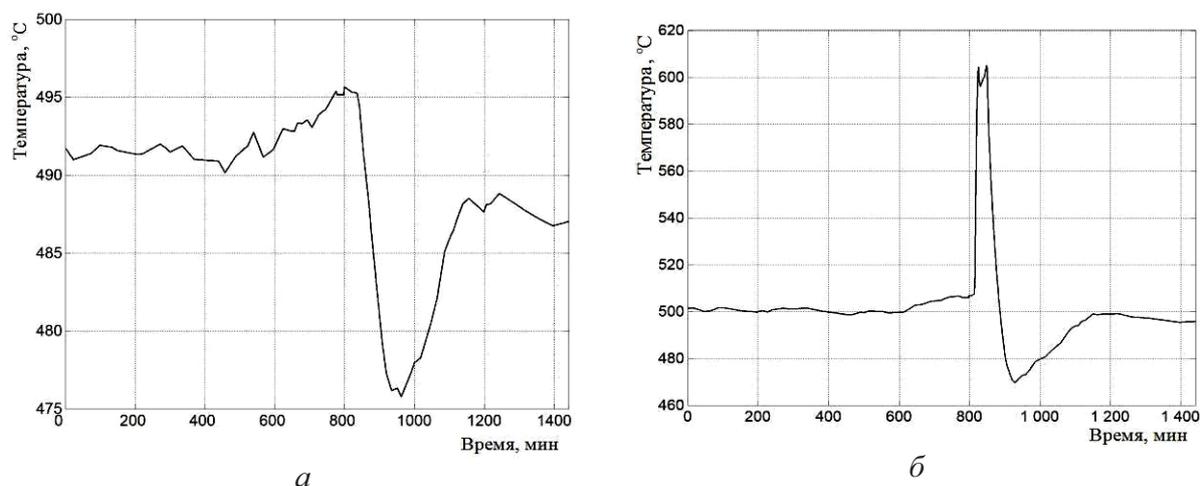


Рис. 4. Изменение температуры дымовых газов Р-2 за сутки для: а) верхней; б) нижней зоны

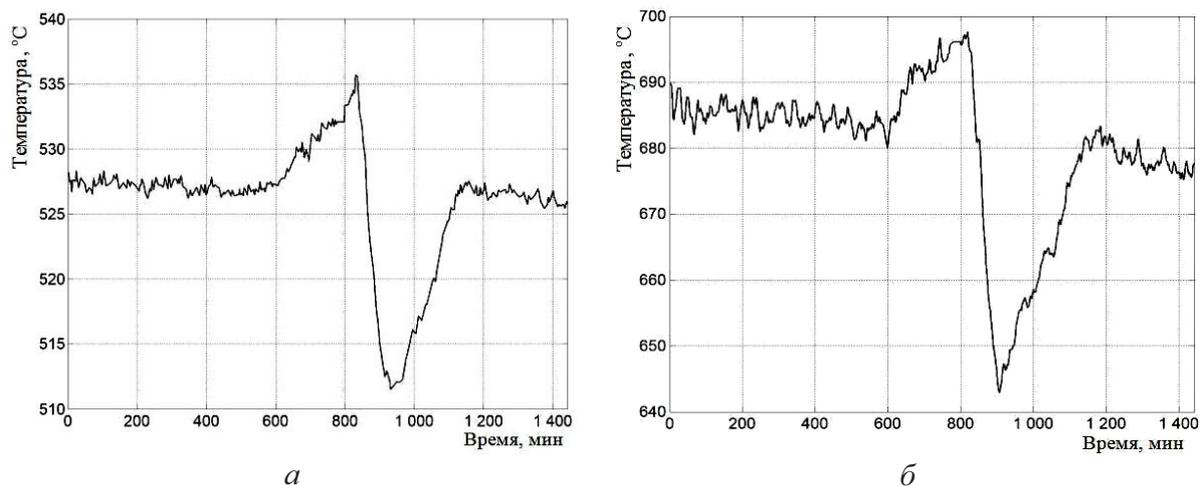


Рис. 5. Изменение температуры катализатора за сутки: а) на входе в Р-2; б) в нижней зоне

ки принятия решения по управлению. Это может привести к снижению качества управления по алгоритму, использующему результаты идентификации объекта рассматриваемым методом. Для дру-

гих переменных, таких как концентрация  $CO$  и  $CO_2$  на выходе дымовых газов, можно использовать три термина, когда достаточно только качественная, а не количественная оценка изменения.

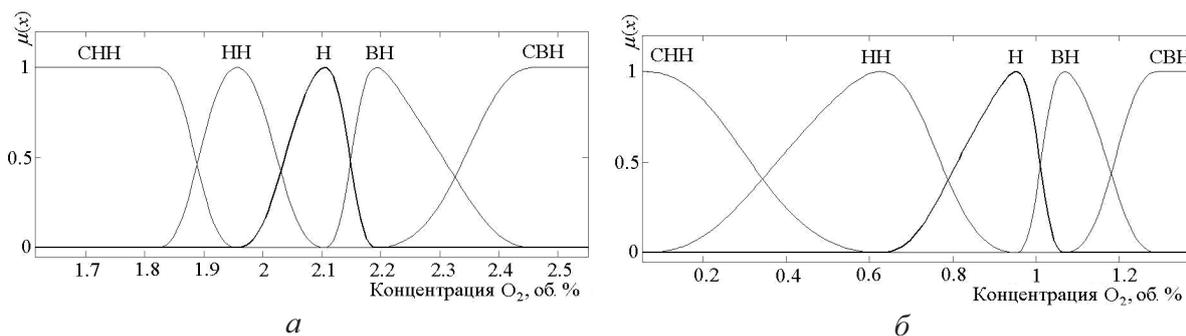


Рис. 6. Функции принадлежности  $\mu(x)$  для концентрации кислорода в дымовых газах P-2 после: а) верхней; б) нижней зоны

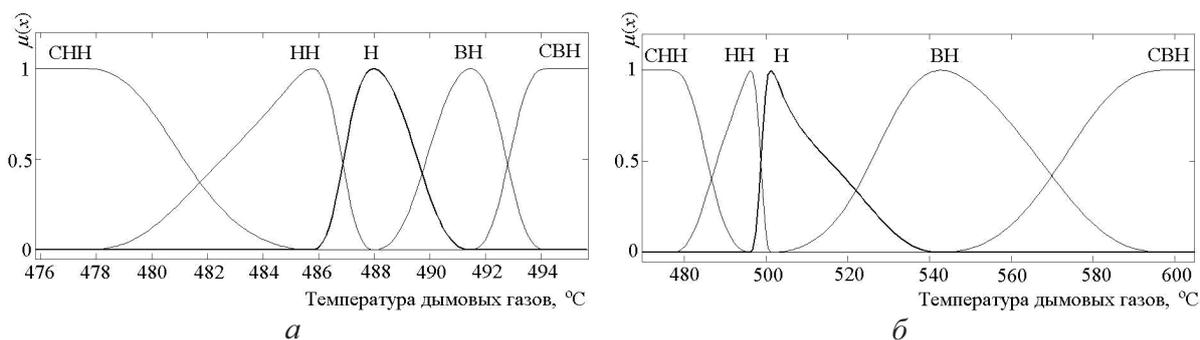


Рис. 7. Функции принадлежности  $\mu(x)$  для температуры дымовых газов на выходе P-2 после: а) верхней; б) нижней зоны

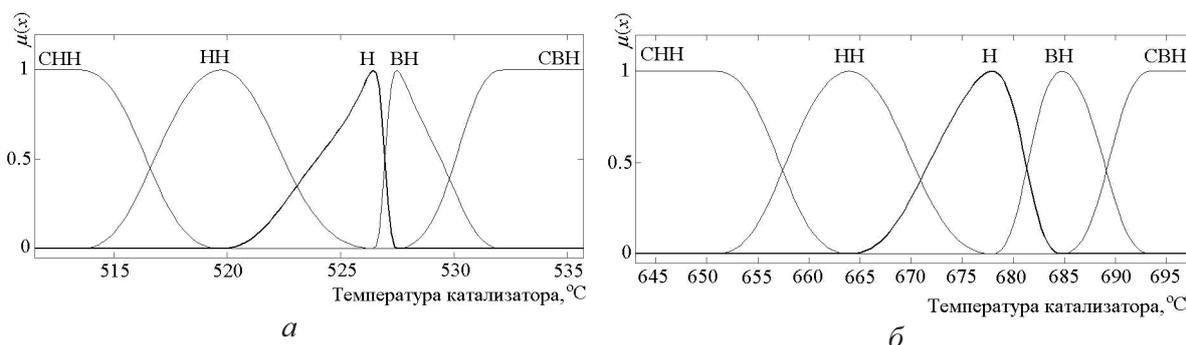


Рис. 8. Функции принадлежности  $\mu(x)$  для температуры катализатора в P-2: а) на входе; б) в нижней зоне

Результаты работы рассмотренного алгоритма свидетельствуют о возможности его применения для формализации данных и использования при синтезе алгоритма управления реакторным блоком, например на основе нечеткой продукционной модели. При такой формализации данных целесообразно выбирать количество классов из ряда нечетных натуральных чисел, начиная с трех, т. к. центральный класс

соответствует нормальному режиму функционирования технологического процесса, а соседние классы соответствуют отклонению от него. Чем больше классов, тем точнее можно реагировать (управлять) на изменение параметров технологического процесса. Однако это приводит к увеличению логических продукционных правил в алгоритме управления, что снижает его надежность при реализации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дидэ Э. Методы анализа данных: подход, основанный на методе динамических сгущений. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 358 с.
2. Шумихин А.Г., Черепанов А.И., Дорохов И.Н., Сидорова Г.А., Звягин В.П. Размытый обучающийся алгоритм классификации, распознавания и прогнозирования аномальных техноло-

гических ситуаций // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – Т. 22. – № 6. – С. 810–815.

3. Шумихин А.Г. Автоматизированное управление химико-технологическими процессами в условиях нестационарности: дис. ... д.т.н. – Пермь, 1998. – Кн. 1. – 340 с.

Поступила 25.02.2010 г.