

Разработка системы диагностики на основе построения дискретной модели технологического процесса (на примере процесса плавления серы)

А. В. Вицентий, А. Е. Пророков

*Институт Информатики и Математического Моделирования
КНЦ РАН, Апатиты*

Важным направлением в организации современных промышленных производств является обеспечение безопасности функционирования технологических процессов. В данной работе рассматривается один из подходов к решению этой проблемы, основанный на создании систем диагностики, основным элементом которых являются дискретные модели химико-технологического процесса (ХТП).

Необходимость создания специальных систем диагностики состояний и управления технологической безопасностью определяется трудностью выявления причин повреждения или отказа в сложных химических производствах и необходимостью обнаружения зарождающихся отказов в технологическом процессе (ТП). Большинство используемых в настоящее время систем обеспечения безопасности позволяет лишь зафиксировать отказ и остановить технологический процесс для предотвращения аварии. При этом частым явлением оказывается ложное срабатывание систем контроля, что приводит к значительным материальным потерям на производстве. Включение в состав АСУ ТП систем автоматизированной диагностики состояний, позволяющих идентифицировать зарождающиеся отказы, позволяет существенно повысить эффективность обеспечения безопасной эксплуатации химических производств [1, 3].

В работе рассматривается построение системы диагностики на основе дискретной модели процесса плавления серы, который является частью процесса получения сернистой кислоты в кислотном отделении целлюлоз-

Разработка системы диагностики

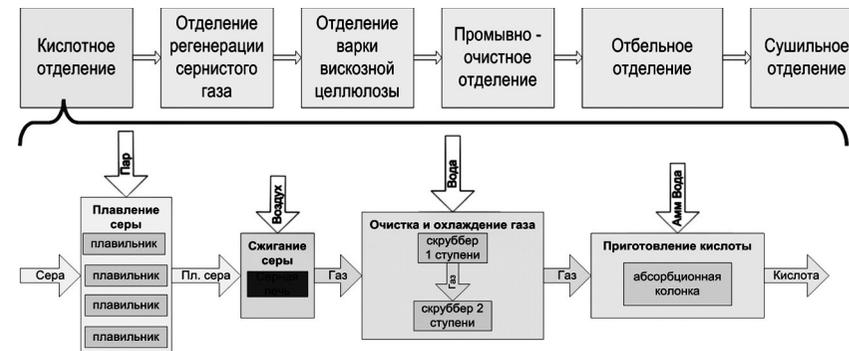


Рис. 1. Процесс получения сернистой кислоты

но-картонного комбината (ЦКК). Производство вискозной целлюлозы является типовым представителем сложных химико-технологических систем (ХТС), которое характеризуется наличием большого числа внешних возмущающих воздействий, входных и выходных параметров, среди которых можно выделить показатели качества работы, как отдельных аппаратов технологических отделений, так и всего производства в целом. Большое влияние на работу технологических процессов оказывает качество сырья, как серы, так и древесины. Причем, в зависимости от мест источников сырья значительно меняются исходные параметры, что в конечном итоге сказывается на качестве продукции, производительности технологии.

Технологический процесс плавления серы является частью процесса получения сернистой кислоты, необходимой для производства вискозной целлюлозы. В общем виде процесс получения сернистой кислоты представлен на рис. 1. Процесс плавления серы является первым технологическим процессом в цепочке процессов получения сернистой кислоты и оказывает существенное влияние на все последующие процессы.

Процесс плавления серы в общем виде можно описать следующим образом. Дробленая сера по транспортеру через печку и три направляющих рукава поступает в плавильники серы (4 шт). В плавильниках сера плавится паром. Параметры поступающего пара — температура 160–165° С, давление — 0,7 МПа (7,0 кгс/см²). При плавлении сера превращается в желтую легко подвижную жидкость (вязкость 7,8–10 спз.). Температура расплавленной серы в плавильниках должна быть не выше 150° С. Для правильной работы серных форсунок уровни расплавленной серы в плавильниках должны быть не менее 2/3 объема.

Входы и выходы для процесса плавления серы можно представить следующим образом (рис. 2). Входной поток $G_1^{(T)}$ — поток твердой дроб-

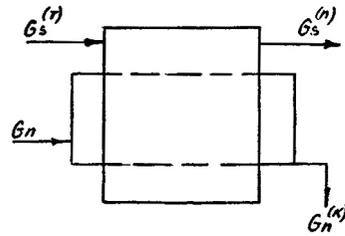


Рис. 2. Схема процесса плавления серы

ленной серы, которую доставляют из складских помещений. Температура входного потока определяется температурой воздуха на складе и равна $\approx 20^\circ \text{C}$ (летом). Входной поток пара G_n имеет следующие параметры: температура $T = 160\text{--}165^\circ \text{C}$; давление $P = 0,7 \text{ МПа}$ ($7,0 \text{ кгс/см}^2$). Выходной поток $G_s^{(n)}$ — поток расплавленной серы, представляющий собой желтую легкоподвижную жидкость имеет $T_{\text{вых}} \approx 1200^\circ \text{C}$. Выходной поток $G_n^{(k)}$ — конденсированный пар. На рис. 1 приведена общая характеристика потоков серы.

Также необходимо отметить и переменные состояния:

$M_s^{(T)}$ — масса твердой серы, находящейся в плавильнике;

$M_s^{(ж)}$ — масса жидкой, уже расплавленной серы;

$T_{i,s}$ — температура смеси в плавильнике.

Математическое описание операции плавления серы. В качестве модели операции плавления серы целесообразно принять двучечную модель, которая учитывает наличие двух фаз, твердой серы и жидкой.

Взаимосвязь этих двух фаз по тепловым и материальным потокам показана на рис. 3.

Для записи основных балансовых соотношений введем следующие обозначения:

$K_1 F_1 \Delta t_1$ — тепловой поток от греющего пара к 2-х фазной системе (так как передача осуществляется через стенку плавильника, считаем, что

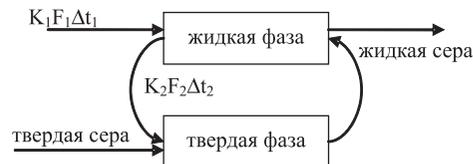


Рис. 3. Двучечная модель плавления серы

тепловой поток в первую очередь поступает в жидкую фазу и от жидкой фазы к твердой фазе);

$K_2 F_2 \Delta t_2$ — тепловой поток от жидкой фазы к твердой фазе;

$G_s^{(T)}(\tau)$ — массовый расход твердой серы, кг/с;

$i_s^{(T)}(\tau)$ — энтальпия твердой серы, Дж/кг;

$G_s^{(ж)}(\tau)$ — массовый расход жидкой серы на выходе из аппарата, кг/с;

$i_s^{(ж)}(\tau)$ — энтальпия жидкой серы, Дж/кг;

$M_s^{(T)}(\tau)$ — масса твердой серы в плавильнике в момент времени, кг;

τ_s — теплота плавления серы, Дж/кг;

$M_s^{(ж)}(\tau)$ — масса жидкой серы в плавильнике в момент времени, кг;

$\Delta M^{(T)}, \Delta M^{(ж)}, \Delta i^{(T)}, \Delta i^{(ж)}$ — изменение соответствующих масс и энтальпий за момент времени (τ);

$G_s^{(n)}$ — массовый выход из твердой фазы плавленной серы в жидкую, кг/с.

Рассмотрим уравнение теплового баланса для жидкой фазы (накопления). Это уравнение может быть представлено как:

$$K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(n)} - G_s^{(ж)}(\tau) \cdot i_s^{(ж)}(\tau).$$

Распишем накопления. Количество тепла в жидкой фазе в момент времени (τ):

$$E_\tau = M_s^{(ж)}(\tau) \cdot i_s^{(ж)}(\tau);$$

$$E_{\tau+\Delta\tau} = (M_s^{(ж)} + \Delta M) \cdot (i_s^{(ж)} + \Delta i^{(ж)});$$

$$E_{\tau+\Delta\tau} = (M_s^{(ж)} i_s^{(ж)} + \Delta; M i_s^{(ж)} + M_s^{(ж)} \Delta i^{(ж)} + \Delta M \Delta i^{(ж)});$$

$$\frac{E_{\tau+\Delta\tau} - E_\tau}{\Delta \tau} = i_s^{(ж)} \cdot \frac{\Delta M^{(ж)}}{\Delta \tau} + M i_s^{(ж)} \cdot \frac{\Delta i^{(ж)}}{\Delta \tau}.$$

$\Delta M * \Delta i^{(ж)} \approx 0$ как бесконечно малое более высокого порядка малости.

Таким образом, уравнение теплового баланса для жидкой фазы может быть записано в следующем виде:

$$i_s^{(ж)} \cdot \frac{dM^{(ж)}}{d\tau} + M_s^{(ж)} \cdot \frac{di^{(ж)}}{d\tau} = K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(n)} - G_s^{(ж)}(\tau) \cdot i_s^{(ж)}(\tau).$$

Распишем уравнение теплового баланса для твердой фазы (накопление):

$$K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(T)}(\tau) \cdot i_s^{(T)}(\tau) - G_s^{(ж)}(\tau) \cdot i_s^{(ж)}(\tau).$$

При рассмотрении данного теплового баланса будем пренебрегать тепловой нагрев твердой серы до точки плавления. Такое упрощение с одной

стороны облегчает общий процесс вычисления, а с другой стороны соответствует модели идеального смешения, т. е. модели с сосредоточенными параметрами.

Будем предполагать, что температура в твердой фазе соответствует температуре точки плавления. Количество тепла в твердой фазе в момент времени (τ)

$$\begin{aligned} E_x &= M_s^{(T)}(\tau) \cdot i_s^{(n)}; \\ E_{x+\mu x} &= (M_s^{(T)} + \Delta M)^{(T)} \cdot i_s^{(n)}; \\ \frac{E_x + \Delta \tau - E\tau}{\Delta \tau} &= i_s^{(n)} \cdot \frac{\Delta M^{(T)}}{\Delta \tau}. \end{aligned}$$

Таким образом, уравнение теплового баланса для твердой фазы имеет вид:

$$i_s^{(n)} \cdot \frac{dM^{(T)}}{d\tau} = K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(T)}(\tau) \cdot i_s^{(T)}(\tau) - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(n)}$$

Для проведения вычислений по выше приведенному математическому описанию введем еще ряд допущений.

1) Будем считать, что тепло, находящееся в плавильнике, распределяется пропорционально массам твердой и жидкой фаз, данное количество тепла можем определить на основе баланса приходящих и уходящих потоков тепла:

$$E = KF \Delta t + G_s^{(T)}(\tau) \cdot i_s^{(T)}(\tau) - G_s^{(x)}(\tau) \cdot i_s^{(x)}(\tau).$$

Член $KF \Delta t$ можно определить на основе теплового баланса греющей камеры, т. е. $KF \Delta t = D\tau$.

Таким образом:

$$\begin{aligned} K_2 F_2 \Delta t &= E / (M_s^{(T)}(\tau) + (M_s^{(x)}(\tau)) * M_s^{(T)}(\tau)); \\ K_1 F_1 \Delta t &= E / (M_s^{(T)}(\tau) + (M_s^{(x)}(\tau)) * M_s^{(x)}(\tau)). \end{aligned}$$

Тепло входных и выходных потоков рассчитывается на основе их физико-химического состояния.

2) Будем считать, что в данный момент времени общая масса серы в плавильнике постоянна и изменения массы жидкой фазы происходит за счет плавления твердой серы, обратный переход из жидкой серы в твердую в рабочем режиме также не происходит. Запишем уравнение материального баланса для твердой и жидкой фаз:

$$\frac{dM^{(T)}}{d\tau} = G_s^{(T)} - G_s^{(n)}; \quad \frac{dM^{(x)}}{d\tau} = G_s^{(n)} - G_s^{(x)}.$$

Подставив данные соотношения в уравнения теплового баланса получим:

$$\begin{aligned} i_s^{(x)} \cdot G_s^{(n)}(\tau) - i_s^{(x)} \cdot \text{cdot} G_s^{(x)}(\tau) + M_s^{(x)} \frac{d i_s^{(x)}}{d\tau} &= \\ &= K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(n)}(\tau) \cdot \text{cdot} i_s^{(n)} - \\ &\quad - G_s^{(x)}(\tau) \cdot i_s^{(n)} \cdot \text{cdot} G_s^{(T)}(\tau) - i_s^{(n)} \cdot \text{cdot} G_s^{(n)}(\tau) = \\ &= K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(T)}(\tau) \cdot \text{cdot} i_s^{(T)} - G_s^{(n)}(\tau) \cdot \text{cdot} i_s^{(n)}. \end{aligned}$$

Для проведения диагностики технологического процесса (ТП) плавления серы по дискретной модели необходимо так же построить ограничения для нее.

Ограничения дискретной модели ТП плавления серы. Запишем основные уравнения материального баланса твердой и жидкой фаз для плавильников серы:

$$\frac{dM^{(T)}}{d\tau} = G_s^{(T)} - G_s^{(n)}; \quad \frac{dM^{(x)}}{d\tau} = G_s^{(n)} - G_s^{(x)}.$$

Подставляя данные соотношения в первое уравнение теплового баланса, имеем:

$$M_s^{(x)} \frac{dM^{(x)}}{d\tau} = (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) + G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(n)} - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(x)}(\tau).$$

Тогда можно записать основные ограничения дискретной модели в виде:

$$\begin{aligned} i_s^{\min(x)} &\leq i_s^{(x)} \leq i_s^{\max(x)}; \\ i_s^{\min(n)} &\leq i_s^{(n)} \leq i_s^{\max(n)}; \\ -G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\max(x)} &\leq -G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(x)} \leq -G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\min(x)}; \\ G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\min(n)} &\leq G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(n)} \leq G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\max(n)}; \\ (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\max(x)} &\leq \\ &\leq (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(x)} \leq \\ &\leq (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\min(x)}; \\ (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) + G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\min(n)} - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\max(x)} &\leq \\ &\leq (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) + G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(n)} - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{(x)} \leq \\ &\leq (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) + G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\max(n)} - G_s^{(n)}(\tau) \cdot i_s^{\min(x)}. \end{aligned}$$

Так как

$$M_s^{(ж)} \frac{dM^{(ж)}}{d\tau} = (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) + G_s^{(n)}(\tau) i_s^{(n)} - G_s^{(n)}(\tau) i_s^{(ж)}(\tau),$$

то основные ограничения дискретной модели для плавильников серы можно записать в виде:

а)

$$M_s^{(ж)} \frac{dM^{(ж)}}{d\tau} \geq (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) + G_s^{(n)}(\tau) i_s^{\min(n)} - G_s^{(n)}(\tau) i_s^{\max(ж)}(\tau);$$

б)

$$M_s^{(ж)} \frac{dM^{(ж)}}{d\tau} \geq (K_1 F_1 \Delta t_1 - K_2 F_2 \Delta t_2) + G_s^{(n)}(\tau) i_s^{\max(n)} - G_s^{(n)}(\tau) i_s^{\min(ж)}(\tau).$$

Для второго уравнения теплового баланса:

$$K_2 F_2 \Delta t_2 = G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(n)} - G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T)}(\tau)$$

имеем:

$$\begin{aligned} i_s^{(n) \min} &\leq i_s^{(n)} \leq i_s^{(n) \max}, \\ i_s^{(T) \min}(\tau) &\leq i_s^{(T)}(\tau) \leq i_s^{(T) \max}, \\ G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(n) \min} &\leq G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(n)} \leq G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(n) \max}, \\ G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T) \min}(\tau) &\leq G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T)}(\tau) \leq G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T) \max}(\tau), \\ -G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T) \max}(\tau) &\leq -G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T)}(\tau) \leq -G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T) \min}(\tau), \end{aligned}$$

тогда ограничения по второму уравнению теплового баланса могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} -K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(T)}(\tau) i_s^{\min(n)} - G_s^{(T)}(\tau) i_s^{\min(T)}(\tau) &\leq \\ &\leq -K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(n)} - G_s^{(T)}(\tau) i_s^{(T)}(\tau) \leq \\ &\leq -K_2 F_2 \Delta t_2 + G_s^{(T)}(\tau) i_s^{\max(n)} - G_s^{(T)}(\tau) i_s^{\min(T)}(\tau). \end{aligned}$$

Таким образом, получена дискретная модель ТП плавления серы и ее ограничения, которые были заложены в основу системы диагностики процесса. Построение дискретной модели технологического процесса является первым шагом в создании системы диагностики ХТП. В процессе работы реального ТП постоянно возникают различные возмущения, которые могут быть связаны как с переходом процесса в режим нештатного функционирования (например, из-за выхода из строя оборудования), что может привести к аварии, так и с изменениями параметров сырья (серы,

энергии и т. д.) или управления (например, ошибки персонала, датчиков, системы управления) [2]. Возмущения любого из этих типов может спровоцировать ложное срабатывание АСУ ТП, что может повлечь за собой значительные материальные убытки для всего производства.

Контроль дискретных ограничений позволяет в значительной степени уменьшить количество ложных срабатываний системы управления (СУ), связанных с кратковременным изменением (биением) параметров. Общая идея данного подхода заключается в том, что при возникновении сигнала о возмущениях в ТП реакция СУ [2, 3] на этот сигнал следует не немедленно, а после проверки дискретной модели процесса. Если ограничения дискретной модели не были нарушены, или были нарушены на короткий, незначительный (устанавливается в системе диагностики) период времени, то такой сигнал можно считать ложным и отнести его к случайным, кратковременным изменениям параметров процесса (биение параметров). Исключением из этого правила может быть специально заданный набор сигналов, который требует немедленного реагирования АСУ в силу их значимости для безопасности ХТП и обслуживающего персонала.

При этом успешность и своевременность устранения неисправностей в химико-технологической системе в большой степени определяется возможностью их быстрого и точного диагностирования. В данной работе предлагается использовать методику диагностики неисправностей ХТС на основе деревьев логического вывода. Так как качество диагностики на производстве может сильно зависеть от квалификации персонала, то существует необходимость программной реализации рассматриваемой методики для целей диагностики и поддержки принятия решений по управлению ТБ. Ниже рассмотрены основные модели и алгоритмы, составляющие методику.

Обобщенная структура системы, обеспечивающей реализацию методики, представлена на рис. 4.

Алгоритм работы по данной методике диагностики можно представить следующим образом:

1. Определение характеристик системы. На этом шаге выводится информация о назначении системы, определяется выходная диагностируемая переменная рассматриваемого ХТП или объекта.
2. Формирование дерева логического вывода. Дерево логического вывода формируется путем последовательного выполнения операций добавления или удаления узлов. При добавлении нового узла запрашивается информация о его имени (например, температура), обозначении (t), количестве термов для оценки и названиях этих термов (например, «низкая», «нормальная», «высокая»).

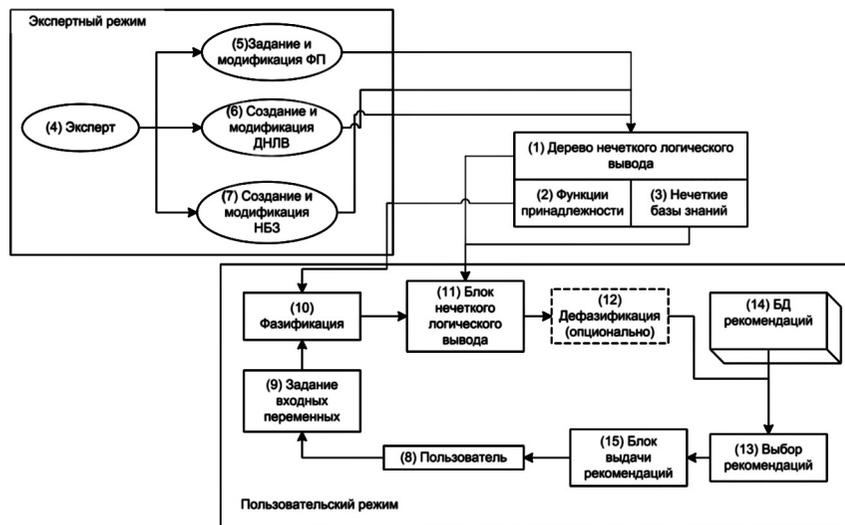


Рис. 4. Обобщенная структура системы диагностики неисправностей

3. Определение функций принадлежности лингвистических термов. На этом шаге определяются модели функций принадлежности, используемые для формализации термов — оценок переменных.
4. Определение экспертных правил ЕСЛИ-ТО, описывающих поведение объекта. Экспертные правила ЕСЛИ-ТО вносятся в соответствующие матрицы знаний, которые могут быть сохранены и собраны в базы знаний (БЗ).

В результате нечеткого логического вывода получают функции принадлежности выходной переменной и оценка диагностируемого параметра ХТС.

Рассмотрим пример диагностики некоторого технологического параметра по методике диагностики неисправностей ХТС на основе дерева логического вывода.

На первом шаге необходимо выделить неполадки, подлежащие диагностике и параметры, которые могут их вызвать. Например, для процесса сжигания серы возможны следующие основные неполадки: d_1 — Не поступает сера к форсункам; d_2 — Не поступает сера из форсунок в печь; d_3 — Не поступает воздух в печь; d_4 — Сера, поступающая из форсунки, не распыляется; d_5 — Снизилась концентрация SO_2 после печи; d_6 — Сублимация серы.

При диагностике неисправностей будем оценивать следующие основные параметры: x_1 — Неисправность паровой рубашки, паропровода; x_2 — Застывание серы в серопроводе; x_3 — Засорение форсунки; x_4 — Остановка вентилятора воздуха; x_5 — Неисправность форсунки; x_6 — Излишнее количество воздуха; x_7 — Попадание воздуха в систему; x_8 — Неполное сгорание серы; x_9 — Неудается отрегулировать уровень SO_2 ; x_{10} — Низкая температура пара; x_{11} — Низкое давление пара; x_{12} — Низкая температура серы.

Перечисленные параметры могут быть измерены непосредственно в ходе работы ТП или выявляться персоналом. Задача диагностики состоит в том, чтобы каждому сочетанию значений параметров поставить в соответствие одно из решений: d_j ($j = 1..6$).

Следующий шаг — построение нечеткой базы знаний. Для этого параметры $x_1 - x_{12}$ будем рассматривать как нечеткие (лингвистические) переменные. Для удобства диагностирования эти переменные можно отнести к некоторым классам:

1. Опасности неисправности оборудования (e): $x_1; x_3; x_4; x_5; x_7$.
2. Опасности несоблюдения технологии ХТП (p): $x_2; x_6; x_8; x_{10}; x_{11}; x_{12}$.
3. Опасности неисправности системы управления (s): x_9 .

Тогда структура модели дифференциальной диагностики ХТС будет отвечать соотношениям: $d = f_d(e, p, s)$; $e = f_e(x_1, x_3, x_4, x_5, x_7)$; $p = f_p(x_2, x_6, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{12})$; $s = f_s(x_9)$.

Обобщенная структура модели диагностики имеет вид, представленный на рис. 5.

Для оценки значений лингвистических переменных $x_1 - x_{12}$ будем использовать единую шкалу термов: Н — низкий, Нм — нормальный, В — высокий. Каждый из этих термов представляет нечеткое множество,

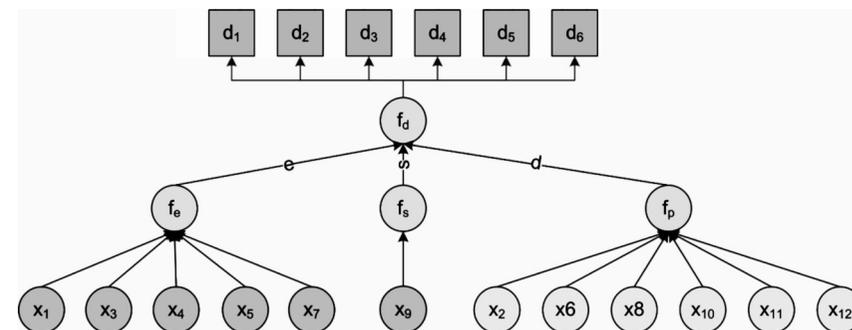


Рис. 5. Обобщенная структура дерева логического вывода

заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. Эти функции могут быть трапециевидными, треугольными, колоколообразными и экспоненциальными. В данной работе использовались трапециевидные функции принадлежности.

Используя операции $\&(\wedge)$ (И — min) и (\vee) (ИЛИ — max), легко записать систему нечетких логических уравнений, связывающих функции принадлежности диагнозов и входных переменных для каждого из возможных диагнозов d_1-d_6 . Общий вид записи функции принадлежности для диагноза d_1 можно представить как:

$$\mu^{d_1}(d) = [\mu^H(e) \wedge \mu^H(p) \wedge \mu^H(s)] \vee [\mu^H(e) \wedge \mu^H(p) \wedge \mu^{H_M}(s)] \vee [\mu^H(e) \wedge \mu^{H_M}(p) \wedge \mu^B(s)],$$

где:

$$\begin{aligned} \mu^H(e) &= [\mu^H(x_1) \wedge \mu^{H_M}(x_3) \wedge \mu^H(x_4) \wedge \mu^H(x_5) \wedge \mu^H(x_7)] \vee \\ &\quad \vee [\mu^H(x_1) \wedge \mu^{H_M}(x_3) \wedge \mu^B(x_4) \wedge \mu^{H_M}(x_5) \wedge \mu^B(x_7)] \vee \\ &\quad \vee [\mu^{H_M}(x_1) \wedge \mu^{H_M}(x_3) \wedge \mu^H(x_4) \wedge \mu^B(x_5) \wedge \mu^{H_M}(x_7)]; \\ \mu^H(p) &= [\mu^H(x_2) \wedge \mu^H(x_6) \wedge \mu^H(x_8) \wedge \mu^{H_M}(x_{10}) \wedge \mu^H(x_{11}) \wedge \mu^B(x_{12})] \vee \\ &\quad \vee [\mu^{H_M}(x_2) \wedge \mu^{H_M}(x_6) \wedge \mu^{H_M}(x_8) \wedge \mu^H(x_{10}) \wedge \mu^{H_M}(x_{11}) \wedge \mu^{H_M}(x_{12})] \vee \\ &\quad \vee [\mu^B(x_2) \wedge \mu^{H_M}(x_6) \wedge \mu^{H_M}(x_8) \wedge \mu^H(x_{10}) \wedge \mu^B(x_{11}) \wedge \mu^H(x_{12})]; \\ \mu^{H_M}(p) &= [\mu^{H_M}(x_2) \wedge \mu^H(x_6) \wedge \mu^{H_M}(x_8) \wedge \mu^B(x_{10}) \wedge \mu^{H_M}(x_{11}) \wedge \mu^H(x_{12})] \vee \\ &\quad \vee [\mu^{H_M}(x_2) \wedge \mu^H(x_6) \wedge \mu^{H_M}(x_8) \wedge \mu^B(x_{10}) \wedge \mu^{H_M}(x_{11}) \wedge \mu^{H_M}(x_{12})] \vee \\ &\quad \vee [\mu^H(x_2) \wedge \mu^H(x_6) \wedge \mu^{H_M}(x_8) \wedge \mu^B(x_{10}) \wedge \mu^B(x_{11}) \wedge \mu^{H_M}(x_{12})]; \\ \mu^H(s) &= \mu^H(x_9); \mu^{H_M}(s) = \mu^{H_M}(x_9); \mu^B(s) = \mu^B(x_9). \end{aligned}$$

Нечеткие логические уравнения такого вида вместе с функциями принадлежности нечетких термов позволяют принимать решение о неисправности в ХТС по следующему алгоритму:

1. Зафиксируем значения параметров состояния ХТС:

$$X^* = (x_1^*; x_2^*; x_3^*; x_4^*; x_5^*; x_6^*; x_7^*; x_8^*; x_9^*; x_{10}^*; x_{11}^*; x_{12}^*).$$

2. Определим значения функций принадлежности $\mu^j x_i^*$ при фиксированных значениях параметров x_i^* , $i = 1..12$.
3. Используя логические уравнения, вычислим значения функций принадлежности $\mu^j x_i^*$ при векторе состояния X^* для всех диагнозов d_1-d_6 . При этом, логические операции И (\wedge) и ИЛИ (\vee) над функциями принадлежности заменяются операциями min и max:

$$\mu(a) \wedge \mu(b) = \min(\mu(a), \mu(b)); \quad \mu(a) \vee \mu(b) = \max(\mu(a), \mu(b)).$$

Определим решение d_1^* , для которого:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1^*}(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*, x_7^*, x_8^*, x_9^*, x_{10}^*, x_{11}^*, x_{12}^*) &= \\ &= \max_{j=1..12} [\mu^{d_1^*}(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*, x_7^*, x_8^*, x_9^*, x_{10}^*, x_{11}^*, x_{12}^*)]. \end{aligned}$$

Таким образом, номер диагноза с максимальным значением $\mu^{d_1^*}$ покажет наиболее вероятный отказ в ХТС, а само значение $\mu^{d_1^*}$ — степень уверенности в данном отказе.

На основе описанных в работе методик была предложена система технической диагностики для основных технологических процессов получения сернистой кислоты кислотного отделения.

Литература

1. Кафаров В. В., Макаров В. В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности. М.: Химия, 1990. 320 с.
2. Богатилов В. Н., Палюх Б. В. Построение дискретных моделей химико-технологических систем. Теория и практика. Апатиты, изд. Кольского научного центра, 1995. 159 с.
3. Богатилов В. Н., Пророков А. Е., Палюх Б. В., Мартыненко И. Б. Методология управления технологической безопасностью непрерывных химико-технологических процессов. Новомосковск, изд. РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 188 с.