

## 7.5. Разработка системы ситуационного управления технологическим процессом каталитической очистки газов

### 7.5.1 Оценка состояния процесса каталитической очистки газов

Состояние процесса управления будем оценивать по следующим технологическим параметрам и ущербам:

$$X = \{T^{Out}, C_{NO+NO_2}, D(C_{NO+NO_2}), D_{об}, D_{CV}\},$$

где  $T^{Out}$  – температура очищенных газов на выходе из реактора каталитической очистки;  
 $C_{NO+NO_2}$  – концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки;  
 $D(C_{NO+NO_2})$  – ущерб от выброса нитрозных газов в атмосферу;  
 $D_{об}$  – ущерб, наносимый оборудованию в результате его эксплуатации;  
 $D_{CV}$  – ущерб, наносимый системе управления в результате ее эксплуатации.

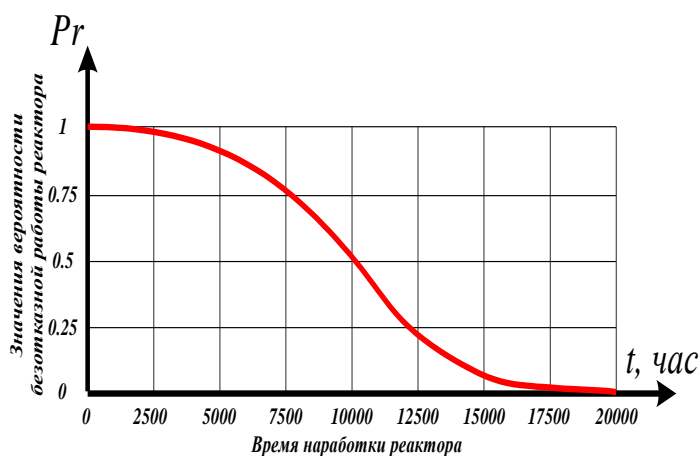
Для оценки состояния процесса введены соответствующие лингвистические переменные, определены их терм-множества и заданы функции принадлежности каждому терм-множеству лингвистической переменной.

Формализация первых двух лингвистических переменных представлена в предыдущем разделе.

**Формализация лингвистической переменной «ущерб от выброса нитрозных газов в атмосферу».** На уровне эвристических оценок зависимости «ущерб от выброса нитрозных газов в атмосферу» можно сделать вывод, что величина ущерба зависит от величины концентрации нитрозных газов, и что потенциальные выбросы и, соответственно, потенциальный ущерб возрастают с уменьшением надежности оборудования. Таким образом, предполагается, что величина ущерба пропорциональна концентрации выбросов нитрозных газов в атмосферу и концентрация растет с ростом вероятности возникновения отказов в оборудовании.

В силу сложности получения статистического материала такого рода оценка выбросов осуществлялась на основе лингвистической переменной «концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки» и параметра «вероятность безотказной работы».

По вероятности отказа реактора каталитической очистки газов оценивались значения следующих термов:  $D(C_{NO+NO_2})_1$  – очень малый ущерб (низкая концентрация);  $D(C_{NO+NO_2})_2$  – малый ущерб (средняя концентрация);  $D(C_{NO+NO_2})_3$  – средний ущерб (повышенная концентрация);  $D(C_{NO+NO_2})_4$  – высокий ущерб (высокая концентрация). Графики соответствующих термов в зависимости от вероятности их безотказной работы.



На основе статистических исследований отказов работы реактора каталитической очистки составлялись функции распределения вероятности безотказной работы реактора, в результате чего был сформирован график, изображенный на рисунке 7.25. Для построения данного графика также учитывались экспертная оценка и техническая документация на реактор каталитической очистки газов. Критерием при составлении данной зависимости было время наработки реактора на отказ.

Рис. 7.25 Зависимость безотказной работы

реактора каталитической очистки газов от времени наработки

Была получена сводная таблица ущербов от выброса нитрозных газов в атмосферу в зависимости от вероятности безотказной работы реактора каталитической очистки (табл. 7.4).

Таблица 7.4

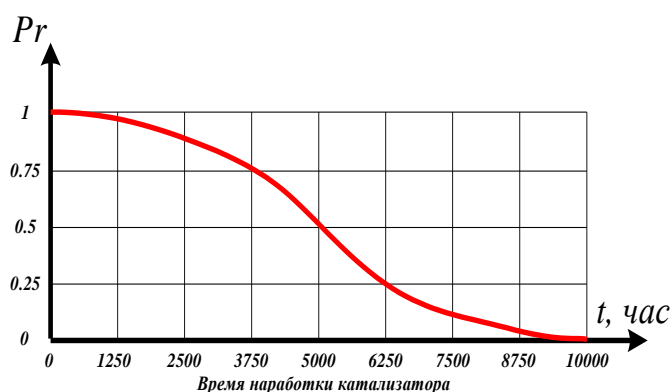
Сводная таблица ущербов от выброса нитрозных газов в атмосферу в зависимости от изменения концентрации нитрозных газов после реактора каталитической очистки с учетом вероятности его безотказной работы

Ущерб	Вероятность безотказной работы реактора каталитической очистки газов	Диапазон изменения концентрации
$D(C_{NO+NO_2})_1 =$ «очень малый»	[0.6; 1]	[0; 0.002]
$D(C_{NO+NO_2})_2 =$ «малый»	[0.4; 0.8]	[0.001; 0.003]
$D(C_{NO+NO_2})_3 =$ «средний»	[0.2; 0.6]	[0.002; 0.004]
$D(C_{NO+NO_2})_4 =$ «высокий»	[0; 0.4]	[0.003; 0.005]

#### Формализация лингвистической переменной «ущерб, наносимый оборудованию».

На уровне эвристических оценок зависимости «ущерб, наносимый оборудованию» можно сделать вывод, что величина ущерба зависит от продолжительности работы самого оборудования и, в данном случае, от продолжительности работы катализатора реактора каталитической очистки. Таким образом, в работе предполагается, что величина ущерба пропорциональна износу катализатора, и, соответственно, износ катализатора потенциально растет с ростом вероятности возникновения отказов в оборудовании.

По вероятности отказа катализатора реактора оценивались значения термов:  $D_{O61}$  – очень малый ущерб (нормальный катализатор);  $D_{O62}$  – малый ущерб (немного изношенный катализатор);  $D_{O63}$  – средний ущерб (сильно изношенный катализатор);  $D_{O64}$  – высокий ущерб (критически изношенный катализатор). Получены графики соответствующих термов в зависимости от вероятности их безотказной работы.



На основе статистических исследований отказов работы катализатора реактора с учетом экспертных оценок и данных технической документации на реактор каталитической очистки газов определена функция распределения вероятности безотказной работы катализатора (рис. 7.26).

Рис. 7.26 Зависимость безотказной работы катализатора от времени наработки

#### Формализация лингвистической переменной «ущерб, наносимый системе

управления». Величина ущерба пропорциональна износу системы управления, и, соответственно, ущерб потенциально растет с ростом вероятности возникновения отказов в системе управления.

По вероятности отказа системы управления оценены значения следующих термов:  $D_{CV1}$  – очень малый ущерб (малое время работы);  $D_{CV2}$  – малый ущерб (среднее время работы);  $D_{CV3}$  – средний ущерб (длительное время работы);  $D_{CV4}$  – высокий ущерб (очень большое время работы). В результате получали графики соответствующих термов в зависимости от вероятности их безотказной работы. Построен график функции распределения вероятности безотказной работы системы управления.

В результате проведенной формализации лингвистических переменных состояние технологического процесса будет записано в виде, показанном в таблицах 7.5 – 7.7.

Таблица 7.5

Форма записи состояния технологического процесса каталитической очистки газов в базе знаний по технологическим параметрам

$T^{Out}$			$C_{NO+NO_2}$			
$T_1$	$T_2$	$T_3$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
$\mu_{i1}(T^{Out})$	$\mu_{i2}(T^{Out})$	$\mu_{i3}(T^{Out})$	$\mu_{i1}(C_{NO+NO_2})$	$\mu_{i1}(C_{NO+NO_2})$	$\mu_{i3}(C_{NO+NO_2})$	$\mu_{i4}(C_{NO+NO_2})$

Таблица 7.6

Форма записи состояния технологического процесса каталитической очистки газов в базе знаний по ущербу от выброса нитрозных газов в атмосферу

$D(C_{NO+NO_2})$			
$D(C_{NO+NO_2})_1$	$D(C_{NO+NO_2})_2$	$D(C_{NO+NO_2})_3$	$D(C_{NO+NO_2})_4$
$\mu_1(D(C_{NO+NO_2}))$	$\mu_2(D(C_{NO+NO_2}))$	$\mu_3(D(C_{NO+NO_2}))$	$\mu_4(D(C_{NO+NO_2}))$

Таблица 7.7

Форма записи состояния технологического процесса каталитической очистки газов в базе знаний по ущербам, наносимым оборудованию и системе управления

$D_{O_6}$				$D_{CY}$			
$D_{O_61}$	$D_{O_62}$	$D_{O_63}$	$D_{O_64}$	$D_{CY1}$	$D_{CY2}$	$D_{CY3}$	$D_{CY4}$
$\mu_1(D_{O_6})$	$\mu_2(D_{O_6})$	$\mu_3(D_{O_6})$	$\mu_4(D_{O_6})$	$\mu_1(D_{CY})$	$\mu_2(D_{CY})$	$\mu_3(D_{CY})$	$\mu_4(D_{CY})$

где  $i$  – номер состояния технологического процесса каталитической очистки газов.

### 7.5.2. Определение центра технологической безопасности процесса каталитической очистки газов

Наблюдения за агрегатом производства неконцентрированной азотной кислоты показывают, что температура очищенных газов на выходе реактора каталитической очистки должна быть постоянной и равняться  $720^{\circ}\text{C}$ . Поэтому и центр технологической безопасности по температуре очищенных газов на выходе реактора каталитической очистки будет неизменен:  $T_o^{Out} = 720,^{\circ}\text{C}$

Для расчета центра безопасности технологического параметра «концентрация окислов азота на выходе из реактора» был определен интервал изменения параметра в области регламентного состояния процесса –  $C_{NO+NO_2} \in [0;0.005]$ .

Данный интервал разбит на множество непересекающихся диапазонов изменения концентрации:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\} = \{(0;1.5), (1.5;2), (2;2.5), (2.5;3), (3;3.5), (3.5;5)\} \cdot 10^{-3}$$

Задано нечеткое отношение предпочтения  $xRy$  – «интервал  $x$  значений параметра  $C_{NO+NO_2} \in \Delta C_{NO+NO_2}^{peel}$  не хуже (с точки зрения безопасности функционирования технологического процесса) интервала  $y$ » в виде матрицы (таблица 7.8).

Матрица нечеткого отношения доминирования  $R^D = R \setminus R^{-1}$  с функцией принадлежности  $\mu_{R^D}(y, x) = \max\{\mu_R(y, x) - \mu_R(x, y), 0\}$  представлена в таблице 7.9.

Таблица 7.8

Отношение предпочтения на множестве интервалов параметра «концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки».

Интервал	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
$y_1$	1,0	0,2	0	0,1	0,5	0,7
$y_2$	0,6	1,0	0,2	0,1	0,6	0,8
$y_3$	1,0	0,7	1,0	0,8	0,9	1,0
$y_4$	0,5	0,4	0,2	1,0	0,1	0
$y_5$	0,6	0,5	0,1	0,7	1,0	0,3
$y_6$	0,7	0,3	0,1	0,9	0,7	0,1

Таблица 7.9

Отношение доминирования на множестве интервалов параметра «концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки».

Интервал	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
$y_1$	0	0	0	0	0	0
$y_2$	0,4	0	0	0	0	0,1
$y_3$	1,0	0,5	0	0,6	0,7	0,9
$y_4$	0,4	0,3	0	0	0	0
$y_5$	0,1	0	0	0,6	0	0
$y_6$	0	0	0	0,9	0,4	0

Определим нечеткое подмножество недоминируемых альтернатив согласно выражению  $\mu_R^{n.d.}(y) = 1 - \max_{x \in Y} \{\mu_{R^D}(y, x)\}$  (табл. 7.10).

Таблица 7.10

Множество недоминируемых альтернатив интервалов параметра «концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки».

$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
0	0,5	1,0	0,1	0,3	0,1

Определены максимально недоминируемые альтернативы модели выбора  $(Y, R(\mu_R))$ .

$$Y^{n.d.} = \{y / y \in Y, \mu_R^{n.d.} = \sup \mu_R^{n.d.}(z), z \in Y\} = \{y_3\}$$

Выделив из полученного нечеткого множества  $Y_R^{n.d.}$  интервал, имеющий максимальную степень недоминируемости, получаем интервал  $y_i^0$ , который является наиболее предпочтительным для данного технологического параметра с точки зрения безопасности.

Таким образом, область технологической безопасности параметра «концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки» будет являться интервал  $y_3 \equiv [0.002; 0.0025]$ .

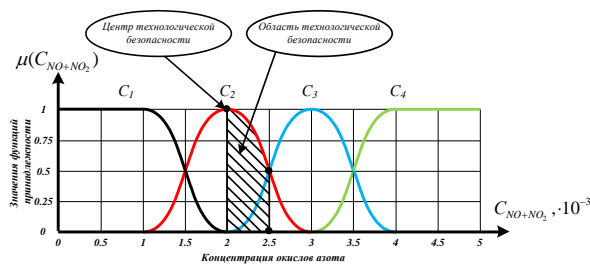


Рис. 7.27 Центр технологической безопасности параметра «концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки».

Значение параметра  $C_{NO+NO_2}^0$  из интервала  $y_3 \equiv [0.002; 0.0025]$ , соответствующего области технологической безопасности процесса, для которого  $\mu_{C_i}(C_{NO+NO_2}^0) = \max_{C_{NO+NO_2} \in y_3} \mu_{C_i}(C_{NO+NO_2})$

определил центр технологической безопасности параметра «концентрация окислов азота на выходе из реактора каталитической очистки» (см. рис. 7.39).

Таким образом

$$C_{NO+NO_2}^0 = 0.002.$$

Аналогично производился расчет центров безопасности параметров «ущерб от выброса нитрозных газов в атмосферу», «ущерб, наносимый оборудованию», «ущерб, наносимый системе управления» [81]

В результате анализа установлено, что для узла каталитической очистки газов состояние процесса управления, соответствующее центру технологической безопасности по технологическим параметрам и ущербам будем считать неизменным и равным:

$$X^0 = \{T_O^{Out}, C_{NO+NO_2}^0, D^0(C_{NO+NO_2}), D_{Ob}^0, D_{CV}^0\} = \{720; 0.002; 0.6; 0.6; 0.6\}.$$

### 7.5.3. Алгоритм управления технологическим процессом

Алгоритм управления технологическим процессом каталитической очистки газов представлен в виде блок-схемы на рисунке 7.28.

Показания технологических датчиков (датчик температуры газов на входе в реактор каталитической очистки, датчик температуры газов на выходе из реактора каталитической очистки и др.) поступают в блок оценки текущего состояния процесса (БОТС).

В блоке оценки состояния проводится фаззификация входных переменных. Для этих целей по результатам экспертного опроса определяются терм-множества и функции принадлежности термам каждого технологического параметра. Текущая ситуация определяется множеством нечетких значений технологических параметров и ущербов (табл. 7.5 – 7.7). Результат оценки текущей ситуации передается в блок оценки индекса риска (БОИР).

Процесс оценки текущей ситуации происходит одновременно с процессом оценки центра технологической безопасности в одноименном блоке (БОЦТБ), после чего результаты оценки текущей ситуации и ситуации, соответствующей центру технологической безопасности, передаются в блок оценки индекса риска (БОИР).

Для каждой текущей ситуации  $\tilde{S}^*$  определяется индекс риска  $In_{Risk}(\tilde{S})$  как степень нечеткого равенства между текущей ситуацией и ситуацией, соответствующей центру технологической безопасности  $\tilde{S}_0$ .

Далее, в блоке поиска управляющих решений (БПУР), проводится проверка:

– если индекс риска текущей ситуации  $\tilde{S}^*$  меньше некоторого значения  $l$ , называемого границей технологической безопасности процесса по технологическим параметрам и ущербам, то значение вектора управления  $\bar{u}_{opt} = \bar{u}_k$ , который приводит к ситуации  $\tilde{S}^*$ , является оптимальным. Если условие проверки не выполняется, тогда происходит поиск посредством метода спуска градиента оптимального управляющего вектора  $u_k := u_k - h \cdot \nabla E(\tilde{S})$ , который позволит минимизировать целевую функцию  $E(\tilde{S})$ , представленную индексом риска текущей ситуации  $E(\tilde{S}) := In_{Risk}(\tilde{S})$ .

После определения нового управляющего вектора модель объекта управления прогнозирует новые значения выходных параметров процесса  $T^{Out}$  и  $C_{NO+NO_2}$ . Наиболее рациональной из множества альтернатив будет являться ситуация, имеющая минимальный индекс риска.

Процесс принятия управляющего решения является итеративным и заканчивается в результате выполнения условия проверки.

На рисунке 7.29 представлена функциональная схема системы ситуационного управления технологическим процессом каталитической очистки газов.

По измеренным входным параметрам модель управления процессом каталитической очистки газов формирует оптимальный с точки зрения технологической безопасности вектор управления. Координаты данного вектора являются уставками задания при расчете изменения соответствующих управляющих параметров процесса. Нечеткий регулятор обрабатывает уставки на изменение подачи природного газа и смеси «газ-воздух» в камеру сгорания реактора каталитической очистки газов.

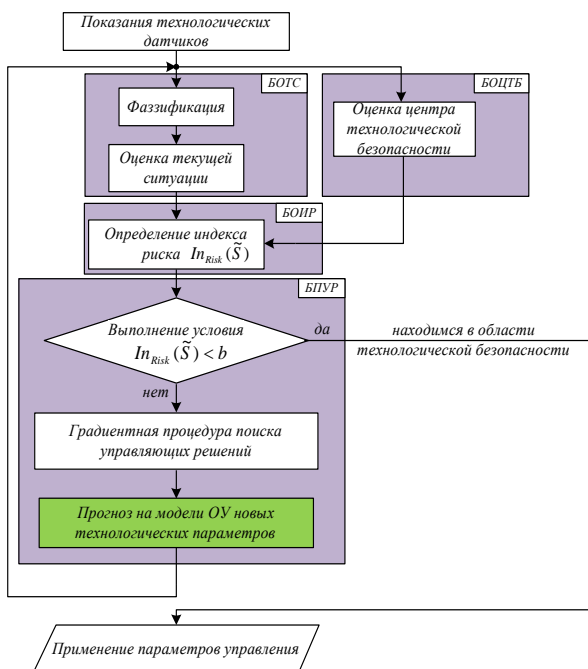


Рис. 7.28 Блок-схема алгоритма управления технологическим процессом каталитической очистки газов.

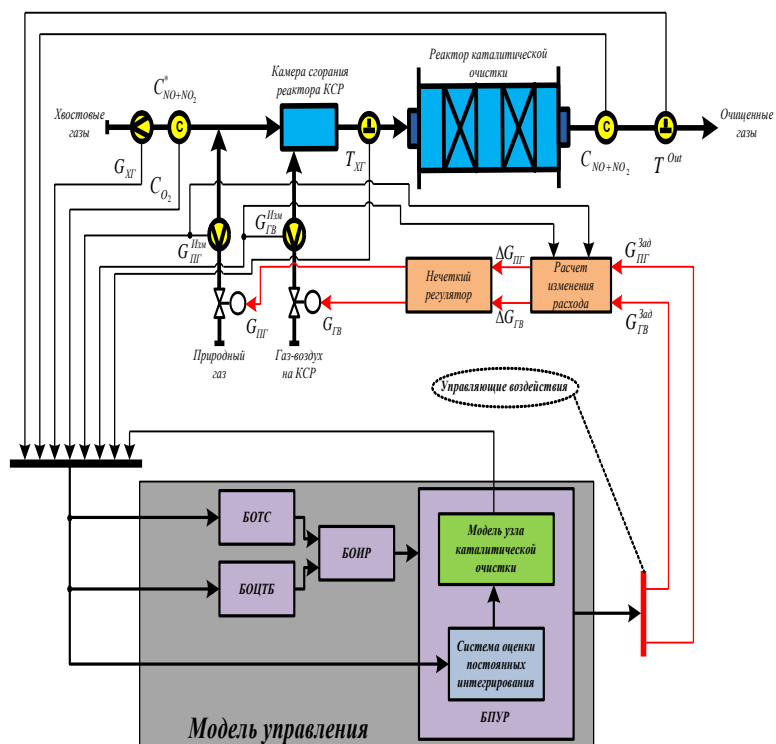


Рис. 7.29 Функциональная схема системы ситуационного управления

Имитационное моделирование системы ситуационного управления узла каталитической очистки с системой оценки постоянных интегрирования проводилось также в среде Matlab 7.0.1. Был

разработан M – file, реализующий алгоритм управления технологическим процессом. В результате проведенного моделирования были получены графики, отображающие переходные, отображающие реальный процесс работы рассматриваемого узла.