

О примере суперпозиции задач управления технологическим процессом

В. Л. Чечулин,
ст. преп., chchulinvl@mail.ru,
ПГНИУ, г. Пермь

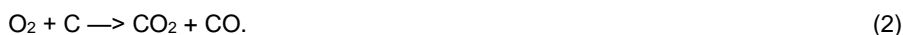
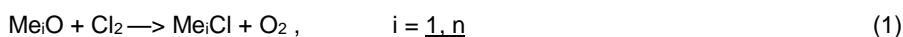
Описан пример суперпозиции процессов управления качеством химико-технологических процессов на примере процесса непрерывного хлорирования оксидов металлов, суперпозиционируемые задачи управления — это а) управление коэффициентом избытка хлора относительно стехиометрии потока оксидов в хлоратор, б) управление коэффициентом избытка углерода относительно связываемого кислорода оксидов. Эти две задачи управления не связаны в цикл, поэтому допускают суперпозицию.

The example of superposition of processes of management of quality of chemical and technological processes on the example of process of continuous chlorination of oxides of metals was described, the superpositioned tasks of management were a) management of coefficient of excess of chlorine concerning by stekhiometry of a stream of oxides in chlorinator, b) management of coefficient of excess of carbon concerning the connected oxygen of oxides. These two tasks of management weren't connected in a cycle therefore allow superposition.

1. Предисловие

На основании общего способа управления качеством химико-технологических процессов ранее рассматривались процессы, имеющие один главный параметр качества и один главный параметр управления [1]. Имеются и процессы, в которых необходимо одновременно контролировать два параметра состояния, имеющие, однако и два независимых параметра управления, таков, например, процесс хлорирования титаносодержащей шихты [2], в хлораторных печах.

Имеется поток шихты, содержащей оксиды металлов и поток хлора в хлоратор, окислы металлов хлорируются и параллельно выделяющийся кислород связывается потоком углерода, подаваемого совместно с шихтой, обобщённые схемы реакций таковы:



По стехиометрии группы реакций (1) вычисляема приближённая потребность в подаче хлора для хлорирования потока окислов, это значение корректируется статистически при учёте параметра концентрации определённого оксида в расплаве хлоратора (в данном случае по концентрации хлорида титана).

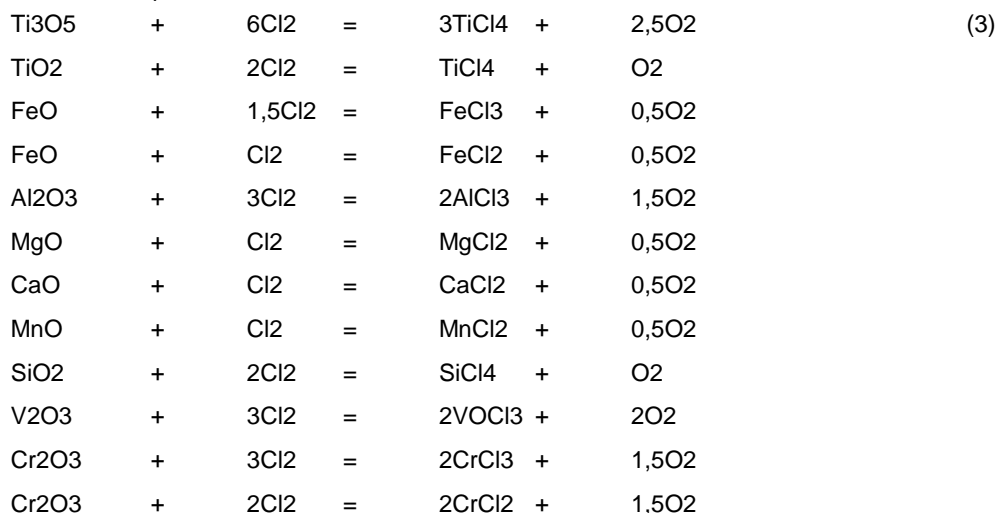
По стехиометрии реакции (2), с учётом вычисленного по группе реакций потока высвободившегося кислорода и технологически заданного отношения CO_2/CO , вычисляема приближённая потребность в подаче углерода для связывания кислорода окислов, — это значение корректируется статистически при учёте параметра концентрации углерода в расплаве хлоратора.

Поскольку реакции (1) и (2) не образуют цикла, (2) зависит от (1), но не наоборот, то одновременное решение этих задач представляет собой суперпозицию "одномерных" задач управления, для решения которых использован способ управления, описанный в [1].

2. Детализация расчета стехиометрий в текущем времени

Основные реакции процесса хлорирования (См. [15]), записаны в двустадийной форме: 1) взаимодействие окисла с хлором 2) взаимодействие отъединённого кислорода с углеродом:

Реакции взаимодействия оксидов с хлором:



2.1. Расчёт массопотока хлора (по массопотоку и составу шихты)

По известному составу шихты и по стехиометрическим соотношениям реакций (при заданных коэффициентах прохлорирования) рассчитываем количество требуемого на прохлорирование хлора (100%-го). Степень прохлорирования принимается равной 100%. В текущем времени требуемый массопоток хлора (по массопотоку шихты) вычисляем по формуле:

$$m_r(\text{Cl}_2) = \sum_{i \in I} \frac{m(\text{шихты}) v_i S(\text{Cl}_2)_i M(\text{Cl}_2)}{M(\text{MeO})_i k(\text{прохлорир.})_i}, \text{ г/с}, \quad (4)$$

где $m_r(\text{Cl}_2)$, г/с,— массопоток хлора (расчётный),
 I , — множество индексов хлорируемых оксидов металлов,
 $m(\text{шихты})$, г/с, — массопоток шихты (измеренный),
 v_i ($v_i \in [0, 1]$, $\sum_{i \in I} v_i = 1$), — относительная массовая доля i -го вещества в шихте,
 $S(\text{Cl}_2)_i$, — стехиометрический коэффициент i -ой химической реакции при хлоре,
 $M(\text{Cl}_2) = 2 \cdot 35,453$ г/моль, — молярная масса хлора,
 $M(\text{MeO})_i$ г/моль, — молярная масса i -го оксида,
 $k(\text{прохлорир.})_i$, — коэффициент прохлорирования i -го оксида (в простейшем случае $k = 1$).

2.2. Расчёт массопотока хлоридов

В текущем времени оценка массопотока хлоридов производима по формуле:

$$m_r(\text{MeCl})_i = \frac{m(\text{шихты}) v_i S(\text{MeCl})_i M(\text{MeCl})_i k(\text{прохлорир.})_i}{M(\text{MeO})_i}, \text{ г/с}, \quad (5)$$

где $m_r(\text{MeCl})$, г/с,— массопоток хлоридов, расчётный,
 I , — множество индексов хлорируемых оксидов металлов,
 $m(\text{шихты})$, г/с, — массопоток шихты (измеренный),
 v_i ($v_i \in [0, 1]$, $\sum_{i \in I} v_i = 1$), — относительная массовая доля i -го оксида в шихте,
 $S(\text{MeCl})_i$, — стехиометрический коэффициент i -ой химической реакции при хлоре,
 $M(\text{MeCl})$ г/моль, — молярная масса i -го хлорида,
 $M(\text{MeO})_i$ г/моль, — молярная масса i -го оксида,
 $k(\text{прохлорир.})_i$, — коэффициент прохлорирования i -го оксида.

Коэффициент избытка массопотока хлора в хлоратор по отношению к требуемому массопотоку хлора:

$$kr(\text{изб. Cl}_2) = m(\text{Cl}_2) / m_r(\text{Cl}_2), \quad (6)$$

$m(\text{Cl}_2)$, — массопоток хлора в хлоратор.

2.3. Расчёт массопотока оксидов

В текущем времени оценка массопотока оксидов вычисляема по формуле:

$$m_r(\text{MeO})_i = m(\text{шихты}) v_i, \text{ г/с}, \quad (7)$$

где $m_r(\text{MeO})$, г/с,— массопоток оксидов, расчётный,
 I , — множество индексов хлорируемых оксидов металлов,
 $m(\text{шихты})$, г/с, — массопоток шихты (измеренный),
 v_i ($v_i \in [0, 1]$, $\sum_{i \in I} v_i = 1$), — относительная массовая доля i -го оксида в шихте.

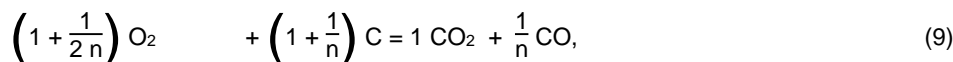
2.4. Связывание кислорода углеродом

Реакция связывания кислорода углеродом:



где $p + q/2 = 1$

$p/q = n$ — отношение молярных потоков CO_2 и CO . ($n > 8$ по техническим нормам. В данном случае [2] $p=8$, $q=1$.)



Эта реакция необходима для того, чтобы не допустить окисление металлоконструкций системы конденсации и образования оксихлоридов при конденсации хлоридов.

По известному составу шихты и по стехиометрическим соотношениям реакций (при заданных коэффициентах прохлорирования) рассчитать количество подлежащего связыванию углеродом кислорода.

В текущем времени расчётная величина массопотока кислорода от продуктов хлорирования вычисляемая по формуле:

$$m_r(\text{O}_2) = \sum_{i \in I} \frac{m(\text{шихты}) v_i S(\text{O}_2)_i M(\text{O}_2) k(\text{прохлорир.})_i}{M(\text{MeO})_i}, \text{ г/с}, \quad (10)$$

где $m_r(\text{O}_2)$, г/с, — массопоток кислорода (расчётный),
 I , — множество индексов хлорируемых оксидов металлов,
 $m(\text{шихты})$, г/с, — массопоток шихты (измеренный),
 v_i ($v_i \in [0, 1]$, $\sum_{i \in I} v_i = 1$), — относительная массовая доля i -го оксида в шихте,
 $S(\text{O}_2)_i$, — стехиометрический коэффициент i -ой химической реакции при кислороде,
 $M(\text{O}_2) = 2 \cdot 15,9994$ г/моль, — молярная масса кислорода,

$M(\text{MeO})_i$ г/моль, — молярная масса i -го оксида,

k (прохлорир. $_i$) — коэффициент прохлорирования i -го оксида (полагается в первом приближении равным 100%).

Расчётный массопоток углерода (по общему массопотоку кислорода) в текущем времени вычисляется по формуле:

$$m_r(\text{C}) = \frac{m_{\text{ro}}(\text{O}_2)}{M(\text{O}_2) \left(1 + \frac{1}{2n}\right)} \frac{1 + \frac{1}{n}}{M(\text{C})}, \text{ г/с}, \quad (11)$$

$M(\text{C}) = 12,011$ г/моль, — молярная масса углерода.

Оценка текущего массопотока углерода с шихтой:

$$m(\text{C}) = m(\text{шихты}) v[\text{C}], \text{ г/с}, \quad (12)$$

$v[\text{C}]$, — массовая доля углерода в шихте.

Коэффициент избытка углерода (в текущем времени):

$$kr(\text{C}) = m(\text{C}) / m_r(\text{C}) \quad (13)$$

3. Связь состава расплава хлоратора и расчетных коэффициентов

По расчёту стехиометрических соотношений в текущем времени определяются интегральные коэффициенты избытка хлора и углерода за определённый промежуток времени (меньший, чем период пробоотбора состава расплава хлоратора, равный 2 часам). Эти формулы здесь не приводятся.

При использовании данных результатов анализов расплава хлоратора эти данные, поступающие для соответствующих проб (отбираемых через два часа), линейно аппроксимируются для промежутков между пробоотборами способом, указанным в [3]. Тогда для промежуточных периодов оценки состояния расплава хлоратора, с использованием принципа малой вариации параметра управления [1] имеются следующие диаграммы, рис. 1, 2.

3.1. Диаграммы управления

В ряду причинно-следственных связей влияния параметров управления (коэффициента избытка хлора и коэффициента избытка углерода) на параметры качества процесса (концентрацию диоксида титана в расплаве и концентрацию углерода в расплаве) 1-я задача управления, использующая связь коэффициента избытка хлора и концентрации диоксида титана в расплаве является определяющей, задающей условия для решения второй задачи управления, использующей связь содержания углерода в расплаве и избытка дозирования углерода. В обоих этих случаях указанные связи являются статистическими (основанными на протекающих реакциях (3), (9), выявляемыми по результатам химического анализа состава расплава при текущем пробоотборе, общий вид этих связей с учётом использования принципа малой вариации параметра управления (масштаб вариации условно увеличен по отношению к реальному) представлен на рис. 1, 2.



рис. 1. Схема оптимизации баланса хлора и шихты

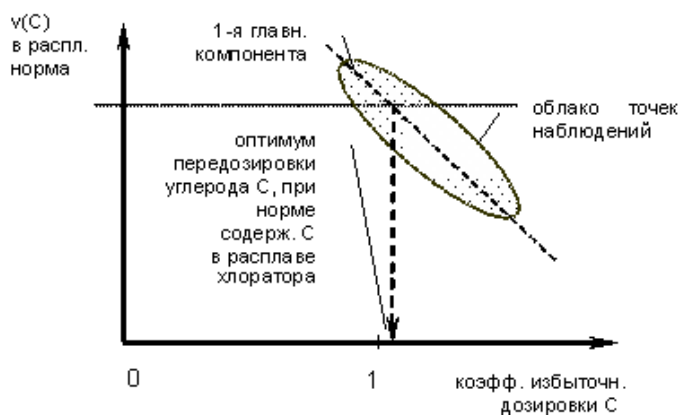


рис. 2. Схема оптимизации баланса углерода

3.2. Особенности отображений

В терминах суперпозиционных отображений решение задачи имеет следующий вид, где X_i — параметра качества, Y_i — параметр управления, Z_i — экономический параметр (на диаграммах не показан¹).

1-я задача: $(Y_1 \rightarrow X_1) \rightarrow Z_1$;

2-я задача: $(Y_2 \rightarrow X_2) \rightarrow Z_2$;

связь задач: $(Y_1 \rightarrow X_2)$.

Поэтому при прочих равных условиях решается вначале 1-я задача, а под её решение подстраивается решение 2-й задачи (ввиду отсутствия влияния второй задачи на первую нет влияния Y_2 на X_1 эта суперпозиция задач управления является разрешимой).

Литература

1. Чечулин В. Л., Метод пространства состояний управления качеством сложных химико-технологических процессов / монография, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2011. — 114 с.
2. Сергеев В. В., Галицкий Н. В., и др., Металлургия титана, М. 1971.— 320 с.
3. Чечулин В. Л., Резвухина М. П. Способ уточнения значений при дискретном измерении параметров (долгопериодическом пробоотборе) // Чечулин В. Л. Статьи в журнале «Университетские исследования» 2009–2014 гг.: сборник [Электронный ресурс]; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. с. 158–162.

¹ Недостаток 1% шихты в материальном балансе (при напрасной потере хлора) — недополучение 0,65% $TiCl_4$, или, при производительности 300 т/сутки недополучение ок. 1,9 т $TiCl_4$, или ок. 700 т в год на 1 хлоратор, всего (при 3-х хлораторах) — недополучение ок. 2100 т в год. (ок. 500 т Ti в год).

Недостаток 1% хлора в материальном балансе (относительно оптимального значения) — потеря ок. 0,5 % $TiCl_4$, или, при производительности 300 т/сутки недополучение ок. 1,5 т $TiCl_4$, или ок. 550 т в год на 1 хлоратор, всего (при 3-х хлораторах) — недополучение ок. 1650 т в год. (ок. 400 т Ti в год).