

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА АЗОПИГМЕНТОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

В наших работах [1, 2] сформулированы задачи и разработаны методы оптимизации химико-технологических процессов и оборудования в условиях неопределенности. Рассмотрим применение этих методов для решения задачи оптимизации процесса азосочетания, осуществляемого в турбулентном трубчатом реакторе. При оптимизации необходимо добиться, чтобы колористические показатели качества $Y_i, i = \overline{1, 8}$ пигмента алого лакокрасочного соответствовали показателям Y_i^T типового образца, т.е. $Y_i \succ Y_i^T$, где знак \succ означает «не хуже». Выполнение вышеперечисленных требований необходимо обеспечить в условиях неопределенности отдельных параметров θ (концентрации 2-наф-толята $c_{Az}^{(0)}$ и диазосоединения $c_D^{(0)}$ в питании реактора азосочетания, кинетических коэффициентов процесса кристаллизации пигмента ($k_I, k_K, A = D/\rho_{II}$)).

При решении задачи оптимизации процесса и реактора азосочетания необходимо определить конструктивные d и режимные z переменные реакторной установки, при которых обеспечивается гибкость (работоспособность) установки в смысле [2] и требования технологического регламента производства (см. выше).

В качестве критерия оптимизации будем использовать приведенные затраты C на производство 1 т пигмента:

$$C(d, z, \theta) = (C_{см} + C_{эн} + E_H C_K) / Q,$$

где $C_{см}$ – затраты на сырье и материалы (составляющая критерия по ресурсосбережению); $C_{эн}$ – затраты на энергоносители (составляющая критерия по энергосбережению); C_K – стоимость изготовления и транспортирования реактора, строительно-монтажных работ при его установке; E_H – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; Q – годовая производительность реакторной установки.

В задаче оптимизации в качестве независимых (оптимизируемых) переменных будем рассматривать диаметр $d_{тр}$ и длину $l_{тр}$ трубчатой части реактора, распределение по длине трубы подач диазосоставляющей $G_D^{(0)(i)}$ и соды $G_S^{(0)(i)}$ ($pH^{(i)}$ среды сочетания) в питании реакторной установки азосочетания.

Постановка задачи оптимизации конструктивных и режимных переменных реактора азосочетания цилиндрического типа имеет следующий вид: требуется определить векторы конструктивных d^* и режимных z^* переменных такие, чтобы приведенные затраты на производство 1 т пигмента достигали минимального значения, т.е.

$$\bar{C}(d, z, \theta) = \min_{d, z} M_\theta \{C(d, z, \theta)\} \quad (1)$$

при связях в форме уравнений математической модели статики процесса азосочетания [3] и ограничениях

$$\begin{aligned} M_\theta \{Q(d, z, \theta)\} &\geq 1000 \text{ т/год}; \\ \text{Вер}_\theta \{Y_i \succ Y_i^T\} &\geq \rho_{зад}; \\ \text{Вер}_\theta \{K_{Az}(d, z, \theta) \geq 99,5 \%\} &\geq \rho_{зад}; \\ \text{Вер}_\theta \{П_\chi(d, z, \theta) \geq 0,05 \%\} &\geq \rho_{зад}; \end{aligned} \quad (2)$$

где \succ – знак соответствия, т.е. показатель Y_i соответствует типовому образцу Y_i^T ; $d = \{d_{тр}, l_{тр}\}$; $z = \{G_D^{(0)(i)}, pH^{(i)}, i = 1, 2\}$.

Вычислительные эксперименты показали, что для нашей задачи число точек ввода реагентов достаточно выбрать равным 2.

Для решения задачи оптимизации (1), (2), ([3]) использовали алгоритм [1]. Математическое ожидание $M_\theta \{Q(a, d, z, \theta)\}$ и вероятностные интегралы в (1) вычисляли методом Монте-Карло. Число стохастических испытаний выбиралось опытным путем из условия незначительного влияния двукратных изменений числа экспериментов на результаты решения задачи оптимизации. Вычислительные эксперименты показали, что это число можно выбрать равным $M = 100$.

Результаты решения задачи (1), (2) приведены в табл. 1. Здесь же для сравнения приводятся результаты расчета оптимальных конструктивных и режимных параметров реакторной установки азосочетания без учета неопределенности.

1 Результаты решения задачи оптимизации (1), (2)

Наименование переменных задачи	Значения переменных	
	Без учета неопределенности	С учетом неопределенности

* Работа выполнена под руководством проф. С.И. Дворецкого.

Конструктивные переменные

Диаметр трубы $d_{тр}$, м	0,05	
Длина трубы $l_{тр}$, м	10,7	18,34
Координаты точек ввода реагентов l , м	[0,0; 5,0]	
Число устройств (диффузор-конфузорного типа) турбулизации потока в реакторе, шт.	1	2

Режимные (управляющие) переменные

Распределение подачи диазораствора, $\gamma^{(i)} = G_D^{(i)} / G_D^{(0)}, i = 1, 2$	0,85; 0,15	0,78; 0,22
Распределение величины рН-среды азосочетания по зонам реактора $pH^{(i)}, i = 1, 2$	7,5; 7,8	7,2; 7,4

Составляющие критерия оптимизации

Стоимость изготовления реактора и строительно-монтажных работ C_K , у.е.	2525,6	3495,0
Затраты на сырье и материалы $C_{см}$, у.е./т	2212,0	2344,7
Затраты на энергоносители $C_{эн}$, у.е./т	25,6	38,9
Амортизационные отчисления, у.е./т	0,3	0,4
Приведенные затраты C , у.е./т	2240,6	2384,0

Значения функций ограничений (2)

Производительность реакторной установки Q , т/год	1000,0
Основной тон Y_1 , (ед. системы Рихтера)	6,9
Насыщенность Y_2 , (ед. системы Рихтера)	3,8
Красящая способность Y_3 , K / S	2,9
Укрывистость Y_4 , $г/м^2$	18,7
Прозрачность, коэффициент контрастности Y_5 , %	75,2
Маслоемкость Y_6 , г/100 г	71,3
Текучесть Y_7 , мм	16,0
Растворимость Y_8 , $кг/м^3$	0,17

Продолжение табл. 1

Наименование переменных задачи	Значения переменных	
	Без учета неопределенности	С учетом неопределенности
Параметры гранулометрического распределения поверхности кристаллов пигмента по их размеру \bar{r} , мкм ; σ^2 , мкм ²	0,12; 0,036	
<i>Значение вероятности выполнения технологических ограничений</i>		
$M_{\theta}\{Q(\bullet)\}$, т/год	957,6	1006,8
$Вер_{\theta}\{Y_1 > Y_1^T\}$	0,67	0,95
$Вер_{\theta}\{Y_2 > Y_2^T\}$	0,65	0,92
$Вер_{\theta}\{Y_3 > Y_3^T\}$	0,68	0,94
$Вер_{\theta}\{Y_4 > Y_4^T\}$	0,72	0,93
$Вер_{\theta}\{Y_5 > Y_5^T\}$	0,78	0,95
$Вер_{\theta}\{Y_6 > Y_6^T\}$	0,67	0,92
$Вер_{\theta}\{Y_7 > Y_7^T\}$	0,72	0,93
$Вер_{\theta}\{Y_8 > Y_8^T\}$	0,71	0,95
$Вер_{\theta}\{K_{Az}(\bullet) \geq 99,5 \%\}$	0,88	0,95
$Вер_{\theta}\{\Pi_{\chi}(\bullet) \leq 0,5 \%\}$	0,75	0,91

Учет неопределенности параметров, изменяющихся в заданных пределах, приводит к увеличению длины трубчатого реактора на 7,64 м, что в свою очередь, требует увеличения капитальных на 969,4 у.е. и приведенных затрат на 143,4 у.е./т.

Однако наличие такого запаса оправдывается тем, что данный проект можно рекомендовать к промышленной реализации, поскольку все ограничения выполняются с заданной вероятностью ($p_{\text{зад}} = 0,9$) независимо от изменения неопределенных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Бодров В.И., Дворецкий С.И., Дворецкий Д.С. Оптимальное проектирование энерго-и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии // Журнал РАН. Теоретические основы химической технологии (ТОХТ). 1997. Т. 31. № 5. С. 542 – 548.

Кафедра «Машины и аппараты химических производств»