

*Е.В. Пешкова, И.В. Пешкова*

### МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

При анализе математических моделей ХТС в процессах оптимизации и проектирования важную роль играют многокритериальные методы, позволяющие учесть противоречивые требования, предъявляемые к проектным и конструкторским решениям. Среди таких методов важнейшую роль играют методы многокритериальной оптимизации, в которых заранее известно направление улучшения значений отдельных (частных) критериев. Наиболее распространенным современным подходом к решению задач многокритериальной оптимизации являются методы сведения задачи многокритериальной (векторной) оптимизации к одной из задач математического программирования, в частности метод нахождения области Парето – оптимальных решений, так называемой области компромисса и его сужение.

Объектом исследования являлась установка азосочетания трубчатого типа при производстве азокрасителей [1]. Математическая модель процесса азосочетания, осуществляемого в трубчатом реакторе [1], представляет собой систему из  $N + 4$  жестких нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, где  $N$  – число интервалов изменения размеров частиц пигмента, дополненных уравнениями, характеризующими связь колористических и физико-технологических свойств пигментов с медианой размеров кристаллов пигмента  $d_{ms}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$  от значения медианы [2]. Решение жестких дифференциальных уравнений осуществлялось методом Гира.

Технологическим регламентом непрерывного производства азокрасителей к реакторной установке азосочетания предъявляются следующие требования (ограничения): по выходу пигмента  $K \geq 99,5\%$ ; по содержанию диазосмол  $P_z \leq 0,1\%$ . Выполнение вышеперечисленных требований к реакторной установке необходимо обеспечить в условиях неопределенности отдельных входных параметров: входной концентрации диазосоставляющей  $C_D = 394 (\pm 5\%)$  моль/м<sup>3</sup>, входной концентрации азосоставляющей  $C_{Az} = 487$  моль/м<sup>3</sup> ( $\pm 5\%$ ).

К качеству азокрасителей предъявляются высокие требования как по колористическим показателям (интенсивность цвета  $Y_1$ , насыщенность  $Y_2$ , красящая способность  $Y_3$ , укрывистость  $Y_4$ ), так и по физико-химическим свойствам (текучесть  $Y_5$ , маслосмолность  $Y_6$ , прозрачность  $Y_7$ , прочность к растворителям  $Y_8$ ). Поэтому оптимизацию процесса азосочетания целесообразно проводить по критерию соответствия получаемого пигмента типовому образцу [2].

$$Z_i = \left( Y_i - Y_i^* \right)^2 / \left[ \max_{Y_i} \left( Y_i - Y_i^* \right)^2 \right],$$

где  $Y_i^*$  – соответствующий показатель типового образца.

В [2] приведена методика свертки колористических и физико-химических свойств пигмента в суммарный критерий:

$$\Phi = \sum_i \gamma_i Z_i,$$

где  $\gamma_i$  – весовой коэффициент, определяющий важность частного критерия  $Z_i$  [2].

Одновременно необходимо обеспечить минимум приведенных затрат на производство 1 т пигмента.

$$ПЗ(d, z, \theta) = (C_{см} + C_{эн} + E_n \cdot C_k) / Q,$$

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;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $Q$  – годовая производительность реакторной установки.

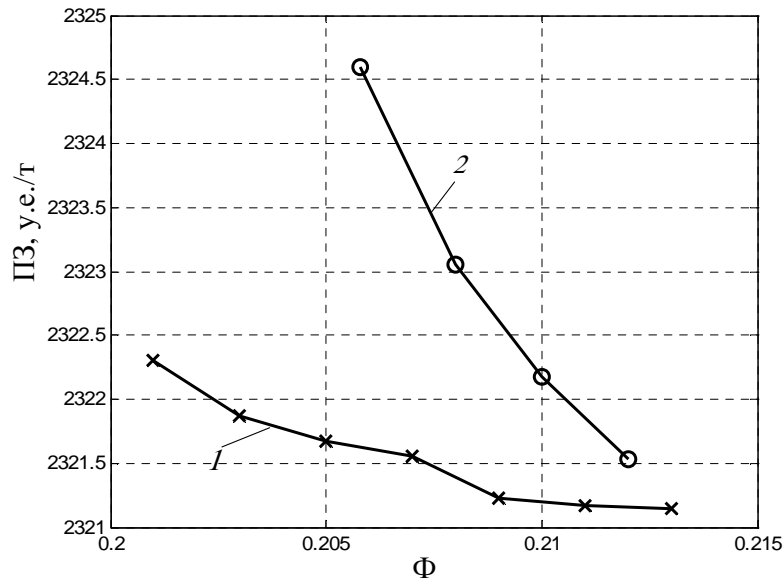
С учетом вышесказанного постановка задачи для случая, когда неопределенные параметры принимают номинальные значения: требуется определить конструктивные переменные реактора азосочетания трубчатого типа  $d^*$  (длину трубчатой части реактора  $L_{тр}$ ), режимные переменные  $z^*$  (распределение по длине трубы подачи диазосоставляющей  $S = C_D^{(0)} G_D^{(0)} / C_{Az}^{(0)} G_{Az}^{(0)}$  и рН<sup>(l)</sup> среды реакции), при которых достигается минимум целевых функций:

$$\min_{d,z} (\Phi(d, z), \text{ПЗ}(d, z))$$

при связях в форме уравнений математической модели и технологических ограничениях:

$$\begin{aligned} Q(d, z) &\geq 1000 \text{ т/год}; \\ K_{Az}(d, z) &\geq 99,5\%; \\ \Pi_{\chi}(d, z) &\leq 0,1\%. \end{aligned}$$

Для поставленной задачи было построено множество Парето (рис. 1, кривая 1) с использованием метода последовательных уступок [3]. Расчет вероятности выполнения ограничений показал, что  $\text{Вер}_{\theta} \{ K_{Az}(\bullet) \geq 99,5\% \}$  для различных точек множества Парето лежит в интервале [0,88 – 0,91].



**Рис. 1. Множество Парето для номинальных значений неопределенных параметров (кривая 1) и в случае учета неопределенности (кривая 2) для трубчатого реактора азосочетания**

Для учета неопределенности формулировалась одноэтапная задача с мягкими ограничениями: требуется определить конструктивные переменные реактора азосочетания трубчатого типа  $d^*$  (длину трубчатой части реактора  $l_{тр}$ ), режимные переменные  $z^*$  (распределение по длине трубы подачи диазосоставляющей  $S = C_D^{(0)} G_D^{(0)} / C_{Az}^{(0)} G_{Az}^{(0)}$  и  $pH^{(i)}$  среды реакции), при которых достигается минимум целевых функций:

$$\min_{d,z} M_{\theta} \{ \Phi(d, z, \theta), \text{ПЗ}(d, z, \theta) \}$$

при связях в форме уравнений математической модели и технологических ограничениях:

$$\begin{aligned} \text{Вер}_{\theta} \{ Q(d, z, \theta) \geq 1000 \text{ т/год} \} &\geq \rho_{\text{зад}}; \\ \text{Вер}_{\theta} \{ K_{Az}(d, z, \theta) \geq 99,5\% \} &\geq \rho_{\text{зад}}; \\ \text{Вер}_{\theta} \{ \Pi_{\chi}(d, z, \theta) \leq 0,1\% \} &\geq \rho_{\text{зад}}, \end{aligned}$$

где  $\rho_{\text{зад}} = 0,95$  – значение заданной вероятности.

Решение одноэтапной задачи с мягкими ограничениями производилось с использованием алгоритма из [4]. Для вычисления вероятностей выполнения ограничений использовался метод Монте-Карло. Число стохастических испытаний выбиралось опытным путем из условия незначительного влияния двукратного изменения числа экспериментов на результаты решения задачи оптимизации и составило  $M = 500$ . Вычисление многомерного интеграла заменили вычислением взвешенной суммы из трех членов, соответствовавших минимальным, номинальным и максимальным значениям неопределенных параметров. Весовые коэффициенты принимались  $w = 1/3$ .

Кривая 2 на рис. 1 построена для случая, когда производился учет неопределенности также с применением метода последовательных уступок [3].

Учет влияния неопределенных параметров привел к сдвигу значений функции  $\Phi(d, z, \theta)$  со значения 0,201 до 0,2058. Из графиков на рис. 1 видно, что постановка и решение одноэтапной задачи оптимизации с мягкими ограничениями для трубчатого реактора азосочетания приводит к увеличению приведенных затрат, главным образом за счет капитальных затрат (увеличения длины реактора с 15,5 до 18,6 м) со значения 2322,3 у. е. / т до 2324,6 у. е. / т. Также очевидно, что при ослаблении требований к качеству пигмента снижаются как приведенные затраты, так и разница между значениями приведенных затрат для задач с номинальными значениями параметров и учета неопределенности. При этом вероятность выполнения всех технологических ограничений для решений, представленных на кривой 2, повышается до [0,95 – 1,0].

Для окончательного принятия решения по данной задаче необходимо руководствоваться инженерными соображениями либо производить постановку и решение специальной задачи с новым критерием, учитывающим важность каждого отдельного (частного) критерия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешкова, Е.В. Моделирование, оптимизация и аппаратурно-технологическое оформление энергоресурсосберегающих установок синтеза азопигментов при наличии неопределенности : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 09.11.07 / Пешкова Евгения Владимировна. – Тамбов, 2007. – 179 с.
2. Гордеев, Л.С. Оптимизация непрерывной технологии синтеза азопигментов / Л.С. Гордеев, С.И. Дворецкий, А.М. Кудрявцев // Химическая промышленность. – 1990. – № 11. – С. 47 – 49.
3. Островский, Г.М. Технические системы в условиях неопределенности: анализ гибкости и автоматизация / Г.М. Островский, Ю.М. Волин. – М. : БИНОМ, 2008. – 319 с.
4. Разработка непрерывной энерго- и ресурсосберегающей технологии получения азопигментов / С.И. Дворецкий, А.В. Майстренко, Д.С. Дворецкий и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1997. – Т. 2, № 1. – С. 76 – 82.