УДК 519.7

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЯ

ALGORITHM OF OPTIMIZATION MODES OF TECHNOLOGICAL PROSESS OF PROPILENGLIKOL PRODUCTION

Магеррамова Тамелла Мустафа кызы
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры инженерии систем управления,
Азербайджанский Государственный Университет
Нефти и Промышленности
tamellatm@gmail.com

Magerramova Tamella Mustafa
Ph. D., Associate Professor of
Engineering control systems,
Azerbaijan State University of
Oil and Industry
tamellatm@gmail.com

Аннотация. На основе всестороннего исследования технологического процесса получения пропиленгликоля, в частности реакции получения пропиленгликоля в гидраторе, сформулирована физически обоснованная математическая постановка задачи оптимального управления эти аппаратом. Установлено, что по своему характеру она является задачей нелинейного программирования, для решения которой предлагается алгоритм оптимизации режимов технологического процесса, основанного на применении метода множителей Лагранжа. Анализ результатов решения задачи оптимального управления процессом получения пропиленгликоля показал, что при поддержании полученных нами оптимальных значений управляющих параметров количество получаемого пропиленгликоля увеличивается по сравнению с реальным на 3,5 %.

Ключевые слова: пропиленгликоль, гидратор, антифриз, удельный вес, оптимизации режимов.

Annotation. On the basis of comprehensive investigation of technological process of propilenglikol production, the article formulated physically motivated mathematical statement for optimum control for hydrator's block. It has been established that by nature it is a problem of nonlinear programming. To solve it article puts forward an algorithm of optimization modes of technological process. This algorithm is based on the application of Lagrange multipliers method. The analysis of the results of the problem solution for optimum control of process has shown that by maintenance of the optimum values of control parameters obtained by us the quantity of propilenglikol increases in comparison with the real by 3,5 percent.

Keywords: propylene glycol, hydrator, antifreeze, specific gravity, optimization.

Известно, что пропиленгликоль широко применяется в качестве основного продукта для получения жидкого антифриза, рабочей жидкости в гидравлических системах, для получения полуэфирных смол, а также может быть использован в производстве лаков, красок и компонентов, используемых в пищевой промышленности.

Технологический процесс производства пропилена, в основном проходит свои стадии в смесителе (С), обеспечивающего смещение окиси пропилена с паровым конденсатом, гидраторе (Г), где происходит гидратация окиси пропилена в пропиленгликоль, трех параллельно работающих корпусах выпарной установки, где осуществляется выпарка парового конденсата продукта и ректификационной колонне (Р).

В гидраторе получение пропиленгликоля осуществляется на основе следующей реакции:

$$\underset{\diagdown\ O\ \diagup}{CH_3 - CH - CH_2} + H_2O \xrightarrow[P = 11 \div 15\ кг/см^2]{T = 160 \div 180°C} \underset{\quad\ \ OH\quad OH}{CH_3 - CH - CH_2}$$

Как видно из вышеприведенной формулы, реакция получения пропиленгликоля – гидратация окиси пропилена в нейтральной среде с добавлением щелочи находится в зависимости от температуры и давления в аппарате. Наряду с основной целью задачи, заключающейся в получении максимального количества пропиленгликоля, необходимо соблюсти регламентные пределы его удельного веса (плотности) 0,981 ÷ 1,036 г/см^3. В связи с этим, задача оптимального управления гидратором запишется в следующем виде:

$$y = f\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) \to \max_{u \in U}. \tag{1}$$

$$0{,}981 \le g = G\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) \le 1{,}036. \tag{2}$$

А ограничения, накладываемые на параметры управления:

$$\begin{cases} 11 \le P \le 15 \ \text{кг/см}^2 \\ 160 \le T \le 180^{\circ}\text{C} \\ 500 \le F_2 \le 1000 \ \text{м}^3/\text{час} \\ 3500 \le F_1 \le 6500 \ \text{м}^3/\text{час} \\ 4 \le \dfrac{F_1}{F_2} \le 6 \end{cases} \qquad (3)$$

Здесь y и g – соответственно количество и плотность пропиленгликоля; P и T – давление и температура в гидраторе; F_2 и F_1 – количество оксипропилена и расход воды, подаваемой всмеситель.

Учитывая вышеуказанное, задачу оптимального управления гидратором словесно можно описать следующим образом: при заданном значении оксипропилена (F_2^0) и удовлетворении ограничений (3) определить (установить) такие значения управляющих параметров температуры, давления и отношения $\dfrac{F_1}{F_2}$ в гидраторе и смесителе, которые удовлетворяют ограничению (2) и обеспечивают максимум получения пропиленгликоля.

Предположим, что согласно выходным координатам технологического процесса производства пропиленгликоля, математические модели в общем виде представляются в виде следующих уравнений [1]:

$$y^* = B_0 + \sum_{i=1}^{n} B_i x_i + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} B_{ij} x_i x_j \ ; \qquad (4)$$

$$g^* = K_0 + \sum_{i=1}^{n} K_i x_i \ . \qquad (5)$$

Здесь y^* и g^* – соответственно количество пропиленгликоля и плотность; вычисленные на основе моделей; K_0, B_0, K_i, B_{ij} $\left(i, j = \overline{1,n}\right)$ – соответственно свободные, линейные и коэффициенты взаимодействия модели; x_i $\left(i = \overline{1,n}\right)$ – входные параметры; n – число входных параметров.

Основываясь на выражениях (4) и (5) вышеприведенной математической постановки задачи оптимизации (1) ÷ (3), можно утверждать, что по своему характеру она является задачей нелинейного программирования. Поэтому, для решения данной задачи нами используется метод множителей Лагранжа [2].

Известно, что применение метода множителей Лагранжа возможно тогда, когда функция (4), характеризующая критерий задачи оптимального управления, является выпуклой. Согласно [3] необходимое условие выпуклости функции (4) состоит в том, что ее коэффициенты – квадратичные эффекты $\left(B_{ij}\left(i, j = \overline{1,n}\right)\right)$ должны быть одинакового знака (положительного или отрицательного).

Для решения задачи выпуклого программирования (1) – (3) составим функцию Лагранжа в следующем виде:

$$\begin{aligned} L\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}, \lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_6\right) &= f_1\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) + \lambda_1\left(g_1\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) - 0{,}981\right) + \\ &+ \lambda_2\left(1{,}036 - g_2\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right)\right) + \lambda_3(180 - T) + \lambda_4(T - 160) + \lambda_5(15 - P) + \\ &+ \lambda_6(P - 11). \end{aligned} \qquad (6)$$

Здесь, $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_6$ – множители Лагранжа.

Известно, что с помощью предложенного метода решения (6) находятся координаты седловой точки функции Лагранжа. Если для всех аргументов $P, T, \dfrac{F_1}{F_2}$ и $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_6$ функции (6) удовлетворяются нижеприведенные условия, то точка $\left\{P^0, T^0, \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0, ..., \lambda_6^0\right\}$ будет называться седловой точкой функции Лагранжа:

$$L\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}, \lambda_1^0, \lambda_2^0, ..., \lambda_6^0\right) \le L\left(P^0, T^0, \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0, ..., \lambda_6^0\right) \le$$
$$\le L\left(P^0, T^0, \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^0, \lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_6\right). \tag{7}$$

На основе теоремы Куна-Таккера [4] сформулируем необходимые и достаточные условия существования седловой точки для функции Лагранжа:

$$\frac{\partial L_0}{\partial P} \le 0; \tag{8}$$

$$P^0 \frac{\partial L_0}{\partial P} = 0; \tag{9}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial T} \le 0; \tag{10}$$

$$T^0 \frac{\partial L_0}{\partial T} = 0; \tag{11}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial \lambda_i} \ge 0 \quad \left(i = \overline{1,6}\right); \tag{12}$$

$$\lambda_i^0 \frac{\partial L_0}{\partial \lambda_i} = 0 \quad \left(i = \overline{1,6}\right); \tag{13}$$

$$\lambda_i^0 \ge 0 \quad \left(i = \overline{1,6}\right). \tag{14}$$

Здесь $\frac{\partial L_0}{\partial P}$, $\frac{\partial L_0}{\partial T}$ и $\frac{\partial L_0}{\partial \lambda_j}$ $\left(j = \overline{1,6}\right)$ – вычисленные значения частных производных функции Лагранжа.

Для решения поставленной задачи, вводя новые неотрицательные переменные $\vartheta_j \left(j = \overline{1,2}\right)$ и $w_i \left(i = \overline{1,6}\right)$, преобразуем неравенства (8), (10) и (12) в равенства вида:

$$\frac{\partial L_0}{\partial P} + \vartheta_1 = 0; \tag{15}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial T} + \vartheta_2 = 0; \tag{16}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial \lambda_1} - w_i = 0 \quad \left(i = \overline{1,6}\right); \tag{17}$$

$$P^0 \vartheta_1 = 0; \tag{18}$$

$$T^0 \vartheta_2 = 0; \tag{19}$$

$$\lambda_i^0 w_i = 0 \quad \left(i = \overline{1,6}\right); \tag{20}$$

$$\lambda_i^0 \ge 0, \ \ \vartheta_i \ge 0, \ \ w_j \ge 0 \quad \left(i = \overline{1,2}, \ \ j = \overline{1,6}\right). \tag{21}$$

Таким образом, для нахождения решения задачи выпуклого программирования (1) ÷ (3) необходимо определить неотрицательное решение системы линейных уравнений (15) ÷ (17) и удовлетворяющее условиям (18) ÷ (20). Это решение можно найти с помощью метода искусственного базиса [4]. В то же время, решение линейных уравнений (18) ÷ (20) с учетом выражений (15) ÷ (17) и условию (21) сводятся к нахождению максимума функции:

$$F = -M\sum_i z_i \,. \tag{22}$$

Здесь z_i – искусственная переменная, а M – достаточно большое положительное число.

В нашем случае математическая модель расхода пропиленгликоля и его удельного веса соответственно описываются следующими уравнениями:

$$\begin{gathered} y = 54{,}465 - 1{,}060\,T + 3{,}550\,P + 40{,}751\frac{F_1}{F_2} + 0{,}006\,T^2 - \\ -0{,}022\,TP - 0{,}148\,T\frac{F_1}{F_2} + 0{,}255\,P^2 - 1{,}562\,P\frac{F_1}{F_2} + 0{,}158\left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2. \end{gathered} \tag{23}$$

$$g = 0{,}950 + 0{,}0002\,T - 0{,}0007\,P + 0{,}0044\frac{F_1}{F_2}\,. \tag{24}$$

Здесь:

$$y = 70{,}18,\quad g = 0{,}9969,\quad T = 170\ ^\circ\text{C},\quad P = 12{,}5\ \text{атм},$$

$$F_2 = 900\ \frac{\text{м}^3}{\text{час}},\quad F_1 = 4100\ \frac{\text{м}^3}{\text{час}},\quad \frac{F_1}{F_2} = 4{,}556$$

Перед тем, как найти экстремум функции (23), удовлетворив условиям (2) ÷ (3), нами на основе математического анализа было установлено, что функция (23) является выпуклой. Тогда функция Лагранжа:

$$\begin{aligned} &L\left(T, P, \frac{F_1}{F_2}, \lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_6\right) = 54{,}465 - 1{,}060T + 3{,}550P + 40{,}751\frac{F_1}{F_2} + \\ &+ 0{,}006T^2 - 0{,}022TP - 0{,}148T\frac{F_1}{F_2} + 0{,}255P^2 - 1{,}562P\frac{F_1}{F_2} + 0{,}158\left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2 + \\ &+ \lambda_1\left(1{,}036 - \left(0{,}950 + 0{,}0002T - 0{,}0007P + 0{,}0044\frac{F_1}{F_2}\right)\right) + \\ &+ \lambda_2\left(0{,}950 + 0{,}0002T - 0{,}0007P + 0{,}0044\frac{F_1}{F_2} - 0{,}981\right) + \lambda_3(180 - T) + \\ &+ \lambda_4(T - 160) + \lambda_5(15 - P) + \lambda_6(P - 11). \end{aligned}$$

И учитывая (15) ÷ (22), поставленная задача сводится к нахождению максимума функции F при удовлетворении нижеследующих условий:

$$\begin{cases} F = -Mz_1 - Mz_2 - Mz_3 \\ 0{,}012T - 0{,}022P - 0{,}0002\lambda_1 + 0{,}0002\lambda_2 - \lambda_3 + \lambda_4 + \vartheta_1 = 1{,}734 \\ -0{,}022T + 0{,}510P + 0{,}0007\lambda_1 - 0{,}0007\lambda_2 - \lambda_5 + \lambda_6 + \vartheta_2 = 3{,}566 \\ 0{,}0002T - 0{,}0007P + w_1 = 0{,}066 \\ 0{,}0002T - 0{,}0007P - w_2 + z_1 = 0{,}011 \\ T + w_3 = 180 \\ T - w_4 + z_2 = 160 \\ P + w_5 = 15 \\ P - w_6 + z_3 = 11 \\ \vartheta_1, \vartheta_2, w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, z_1, z_2, z_3 \ge 0 \end{cases}$$

Результаты решения задачи оптимального управления технологическим процессом получения пропиленгликоля представлены в нижеприведенной таблице 1, из которой видно, что при поддержании полученных нами оптимальных значений управляющих параметров $P, T, F_1/F_2$ количество получаемого пропиленгликоля увеличивается по сравнению с реальным на 2,282 м^3/час (3,5 %).

Таблица 1

Параметры	T	P	$\frac{F_1}{F_2}$	y	g
Реальные	170	12,5	4,556	70,18	0,9969
Оптимальные	160	11	4,556	72,462	0,9940

Литература:

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М. : Химия, 1985. – 359 с.
2. Аоки М. Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования / Под ред. Б.Т. Поляка. – М. : Наука, 1977. – 344 с.
3. Эфендиев И.Р., Мустафаев И.А., Магераммова Т.М. // Известия высших учебных заведений Азербайджана. – 2002. – № 2. – С. 54.
4. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М. : Высшая школа, 1986. – 319 с.

References:

1. Kafarov V.V. Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology. – M. : Chemistry, 1985. – 359 p.
2. Aoki M. Introduction to optimization methods. Fundamentals and applications of non-linear programming / Ed. B.T. Polyak. – M. : Nauka, 1977. – 344 p.
3. Efendiyev I.R., Mustafaev I.A., Magermamova T.M. // Proceedings of higher educational institutions of Azerbaijan. – 2002. – № 2. – P. 54.
4. Akulich I.L. Mathematical programming in examples and problems. – M. : High School, 1986. – 319 p.