

энергетических системах возникает сравнительно мощное радиоизлучение, которое промодулировано слабым радиоизлучением, возникающим внутри композиционных материалов вследствие механического и теплового воздействия. Когда корпус является антенным излучателем, радиоизлучение промодулировано по частоте колебаний этого корпуса, образуя комбинационные частоты относительно несущей частоты. Изменение частоты и интенсивности комбинационных частот свидетельствует об отклонениях от нормальной работы системы. Если эти отклонения превышают установленный порог, то энергетическая система находится накануне выхода из строя. Начало момента выхода из строя определяется по изменению спектрального характера собственного радиоизлучения рассматриваемой энергосистемы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г р е ч и х и н Л. И. Двигатели внутреннего сгорания: Физические основы технической диагностики и оптимального управления. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 270 с.
2. Г р е ч и х и н Л. И., Т и м о ш е в и ч В. Б. Безопасность полетов // Труды V Международ. науч.-техн. конф. «АВИА-2003». – Киев, НАУ, 23–25 апреля 2003 г.
3. Г р е ч и х и н Л. И., Т и м о ш е в и ч В. Б. Прогнозирование времени разрушения отдельных конструктивных деталей сложной механической системы // Машиностроение. – 2003. – Вып. 19.
4. З о м м е р ф е л ь д А. Электродинамика. – М.: Изд-во. иностр. лит., 1958. – 501 с.
5. Г р е ч и х и н Л. И. Устройство для технической диагностики двигателей внутреннего сгорания. Государственный патент Республики Беларусь № 2033 от 14. 10. 1997 г.

Представлена кафедрой  
основ машиностроительного производства  
и профессионального обучения

Поступила 29.04.2003

УДК 004.021:004.942

## **МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КАСКАДА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРА**

**Канд. техн. наук, доц. ДОРОГОВ Н. Н.**

*Могилевский государственный университет продовольствия*

В условиях постоянного роста цен на энергоносители и сырье, при дефиците собственного сырья остро встает вопрос об экономии энергетических и материальных ресурсов для большинства производств. Характерно это и для производства полимера полиэтилентерефталата (ПЭТФ) на Могилевском производственном объединении «Химволокно». Оно отличается высокой энерго- и материалоемкостью. Затраты на сырье и материалы со-

ставляют около 90 %, на топливо и энергию – 2,2 %, а заработная плата – менее 0,4 %. При производительности 6000 т ПЭТФ в месяц даже небольшая экономия дает существенную прибыль.

На стадии переэтерификации (ПЭФ) (начальной стадии процесса) закладываются его основные качественные характеристики, и от правильного проведения зависят в значительной степени потребительские свойства изделий из полимера, такие как: усадка, гигроскопичность, противодействие истиранию, светопрочность и т. д. Известно, что эти свойства в основном определяются количеством побочных продуктов в полимере: диэтиленгликоля (ДЭГ), карбоксильных концевых групп (ККГ), метилтерефталатных концевых групп (МТФКГ). В регламентных требованиях на полимер задаются жесткие нормы на количества ДЭГ, ККГ, МТФКГ, вязкость.

Основным режимным параметром на стадии ПЭФ являются температура и, до некоторой степени, мольное соотношение сырьевых компонентов: этиленгликоля (ЭГ) и диметилтерефталата (ДМТ). Именно выбранный температурный график определяет конкретные значения количеств побочных продуктов, изменить которые на последующих стадиях можно лишь в небольших пределах. При исследовании математических моделей ПЭФ было установлено, что увеличение температуры приводит к возрастанию количеств ДЭГ, ККГ и уменьшению МТФКГ. К тому же оно приводит к более интенсивному испарению ЭГ, т. е. к уносу значительных количеств теплоты. В связи с этим приходится выбирать большие количества ЭГ, чтобы скомпенсировать его уход с паровой фазой. Таким образом, выявляется возможность нахождения некоторого оптимального профиля температур, который бы минимизировал энергетические потери при условии, что количество побочных продуктов находится в разрешенных границах.

Сформулируем постановку задачи оптимизации статического режима стадии непрерывной ПЭФ: найти температурную программу  $T(L)$  последовательности реакторов и значение соотношения ЭГ: ДМТ, минимизирующую функцию цели при условии ограничений на количества МТФКГ, ККГ, ДЭГ и выборе значений переменных из соответствующих множеств допустимых решений  $V_T$  и  $V_n$ .

Формально:

$$\frac{1}{L} \int_0^L T(L) dL \rightarrow \min_{T(L), n};$$

$$x_{15} = \Phi(T(L), x_0);$$

$$x_{15,j} \leq x_j^0, \quad j = 1, 2, 3;$$

$$T(L) \in V_T, \quad n \in V_n.$$
(1)

В качестве критерия оптимальности выбрана средняя температура реакторов, где  $L$  – общая длина реакторов. Этот выбор обусловливается, с одной стороны, тем, что с ее ростом возрастает количество испаренного ЭГ, который уносит значительное количество теплоты, а с другой – харак-

теризует увеличение тепловой энергии, идущей на подогрев жидкой фазы. Математическая модель стадии представлена в виде алгоритмического отображения  $\Phi$ , позволяющего найти вектор выходных параметров при известных температурном профиле  $T(L)$  и векторе входных параметров  $x_0$ . Значения  $x_{15,j}$ ,  $j = 1, 2, 3$ , определяют мольные расходы МТФКГ, ККГ и ДЭГ соответственно на выходе стадии. Последние не должны превышать заданных уровней  $x_j^0$ , которые определяются пересчетом регламентных ограничений к стадии ПЭФ. Множества допустимых значений  $V_T, V_n$  считаются известными.

По постановке сформулированная задача является вариационной, однако из-за трудностей решения, возникающей по причине сложности математического описания, ее имеет смысл упростить. Приведем процедуру последовательного упрощения.

Перейдем к оптимизации в конечномерном пространстве, представив  $T(L)$  в виде суммы линейных функций:

$$T(L) = \sum_{i=1}^{15} [T_{i-1} + b_i(L - L_{i-1})]; \quad L \in [L_{i-1}, L_i]; \quad b_i = (T_i - T_{i-1}) / (L_i - L_{i-1}),$$

где  $L_i - L_{i-1} = \Delta L$  – длина реактора.

Так как температура смеси на входе любого реактора равна температуре на выходе предыдущего, а длина реакторов известна, задача сведется к нахождению оптимального вектора  $T$  с составляющими  $T_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 15$ .

$$\sum_{i=1}^{15} a_i T_i \rightarrow \min_{T_i, i=1,2,\dots,15;n};$$

$$x_{15} = \Phi(\bar{T}(L), x_0);$$

(2)

$$x_{15,j} \leq x_j^0, \quad j = 1, 2, 3;$$

$$T_i \in V_T, \quad n \in V_n.$$

Здесь  $a_i$  – весовые коэффициенты;  $\bar{T}(L)$  – температурный график специфической формы (в виде ломаной).

Следующее упрощение связано с наличием функциональных ограничений-неравенств в (2). Численное решение этой оптимальной задачи достаточно громоздко и требует больших затрат времени. Это связано со следующими ее особенностями:

- решению основной задачи должно предшествовать решение дополнительной задачи о спуске в допустимую область;
- в процессе решения должен производиться постоянный контроль за выполнением функциональных ограничений, при выходе из допустимой области надо предусмотреть механизм возврата;

• при поиске оптимального решения знак ограничения может изменяться (неравенство переходит в равенство и наоборот), в силу этого требуется предусматривать соответствующие изменения в процедуре оптимизации.

В силу этих причин избавимся от ограничений, переведя их в составляющие целевой функции (ФЦ) в соответствии с методикой [1]. Рассматривая ограничения на побочные продукты как частные критерии, перейдем к многокритериальной задаче с ФЦ

$$f_0 = (1 - \bar{x}_1)^{-n_1} + (1 - \bar{x}_2)^{-n_2} + (1 - \bar{x}_3)^{-n_3} + (1 - \bar{T})^{-n_4},$$

где величины  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{T}$  – суть переменные  $x_{15,1}, x_{15,2}, x_{15,3}, T$ , нормированные своими ограничениями;  $n_j > 0, j = 1, 2, 3, 4$ ;

$$\begin{aligned} f_0(T) &\rightarrow \min_{T_i, i=1,2,\dots,15;n}; \\ \mathbf{x}_{15} &= \Phi(\bar{T}(L), \mathbf{x}_0); \\ T_i &\in V_T, n \in V_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Очередное упрощение связано с линеаризацией задачи (3) в небольшой области изменения температур, так как функция  $f_0(T_i)$  имеет слабонелинейный характер. Для решения используем метод проектирования градиента. На каждом шаге будем решать вспомогательную линеаризованную задачу одним из методов линейного программирования (ЛП).

Формулировка вспомогательной задачи в окрестности некоторой точки  $(\mathbf{T}^k, n^k)$ : найти значения вектора  $\delta \mathbf{T}$  и скаляра  $\delta n$ , минимизирующие скалярное произведение градиента функции цели и вектора приращения  $\delta \mathbf{T}$  в точке текущего температурного профиля  $\mathbf{T}^k$  при ограничениях на значения модулей приращения температур  $\delta \mathbf{T}$  и соотношения ЭГ:ДМТ

$$(\nabla f_0(\mathbf{T}^k), \delta \mathbf{y}) \rightarrow \min_{\delta T_i, \delta n}.$$

Модель непрерывной ПЭФ:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{y} &= \{\delta \mathbf{T}, \delta n\}; \\ |\delta T_i| &\leq TM, i = 1, \dots, 15; |\delta n| \leq NM; \\ \delta T_i &\in V_T, \delta n \in V_n. \end{aligned} \quad (4)$$

Условия линеаризованной в окрестности точки  $(\mathbf{T}^k, n^k)$  задачи можно переписать в виде:

$$\Delta y_i + \Delta y_{16+i} = TM, i = 1, \dots, 15;$$

$$\Delta y_{16} + \Delta y_{32} = NM,$$

где

$$\Delta y_i = \Delta T_i + TM / 2, \Delta y_i \geq 0, \Delta y_i \leq TM, i = 1, \dots, 15;$$

$$\Delta y_{16} = \Delta n + NM / 2, \Delta y_{16} \geq 0, \Delta y_{16} \leq NM;$$

$$\Delta y_{16+i} \geq 0, \Delta y_{16+i} \leq TM, i = 1, \dots, 15; \Delta y_{32} \geq 0, \Delta y_{32} \leq NM.$$

Здесь  $TM, NM$  – величины, характеризующие размер локальной области варьирования. В задаче (4) минимизируется приращение целевой функции, взятое по направлению  $\Delta y$ , или

$$\Delta f_0 = \sum_{i=1}^{15} \left( \frac{\partial f_0}{\partial t_i} \right)_{\mathbf{T}^k} \left( \Delta y_i - \frac{TM}{2} \right) + \left( \frac{\partial f_0}{\partial n} \right)_{\mathbf{T}^k} \left( \Delta y_{16} - \frac{NM}{2} \right),$$

где частные производные в точке  $\mathbf{T}^k, n^k$  определяются по методике, аналогичной изложенной в [1].

Алгоритм проектирования градиента применительно к задаче (4) выглядит следующим образом:

1) задаемся начальным вектором температур  $\mathbf{T}^0$  и скаляром  $n^0$  и вычисляем значение целевой функции по модели;

2) в локальной области  $\mathbf{T}(L) \in \mathbf{T}^0(L) \pm \frac{TM}{2}, n \in n^0(L) \pm \frac{NM}{2}$ , определяем значения градиента целевой функции;

3) решаем линеаризованную задачу симплекс-методом ЛП, находя составляющие вектора  $\Delta y$ ;

4) находим новую точку  $\mathbf{T}^1 = \mathbf{T}^0 + \Delta \mathbf{T}, n^1 = n^0 + \Delta n$ ;

5) вновь вычисляем значение ФЦ;

6) если новое значение ФЦ меньше предыдущего, то переходим к п. 2, если нет, то отступаем в предыдущую точку, уменьшаем шаги  $TM, NM$  и переходим к п. 2.

Останов алгоритма производится, если значение шагов становится меньше допустимого.

В процессе поиска производится непрерывный контроль выполнения глобальных ограничений  $\mathbf{T} \in V_T; n \in V_n$  в соответствии с методикой [1].

Результаты решения задачи оптимизации стадии непрерывной ПЭФ показаны на рис. 1 и в табл. 1. Были взяты следующие значения параметров стадии:

- число реакторов – 15;
- начальное распределение температур реакторов соответствует принятому на производстве (профиль 1 на рис. 1);
- глобальные температурные ограничения  $T_{i \min} = 140 \text{ }^\circ\text{C}; T_{i \max} = 252 \text{ }^\circ\text{C}, i = 1, \dots, 15$ ;
- ограничения на величину соотношения ЭГ: ДМТ  $n \in [3,4; 3,6]$ ;
- производительность по ДМТ –  $3,12 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

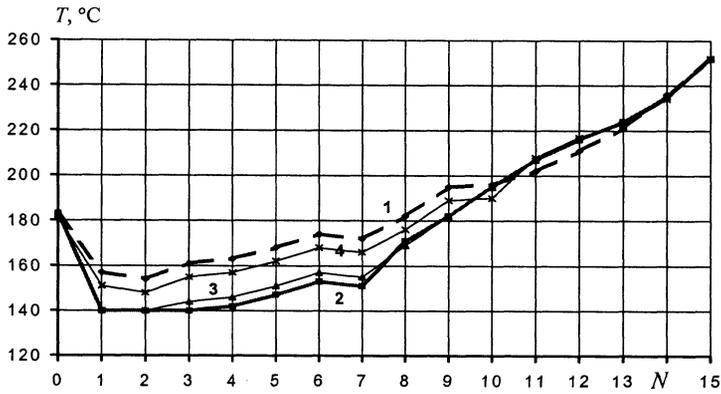


Рис. 1. Оптимальные температурные программы для  $n = 3,6; 3,5; 3,4$  (2, 3, 4) в сравнении с начальным распределением температур (1)

Таблица 1

Сравнение оптимальных решений

Показатель. Программа	$n$ , моль/моль	$T_{\text{ср}}$ , °C	МТФКГ, гэкв/кг	ККГ, ммоль/кг	ДЭГ, % мас.	ЭГ <sub>исп</sub> , моль/мин
1	3,6	189,6	0,035	13,68	0,385	586,2
2	3,6	179,6	0,039	13,56	0,375	585,5
3	3,5	180,9	0,041	13,57	0,375	557,1
4	3,4	186,4	0,037	13,44	0,380	527,5

В табл. 1 приведены значения выходных параметров стадии ПЭФ при оптимальных программах в сравнении с исходной.

ВЫВОД

Реализация оптимального распределения температур позволит уменьшить значение средней температуры на 10 °C (при  $n = 3,6$ ), 9 °C (при  $n = 3,5$ ), 3 °C (при  $n = 3,4$ ), что позволит снизить количество теплоты, затрачиваемой на стадии, соответственно на 5; 9,7; 11,6 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д о р о г о в Н. Н. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов в производстве полимера полиэтилентерефталата. – Мн.: Изд. центр БГУ, 2002. – 120 с.

Представлена кафедрой  
автоматизации технологических  
процессов и производств

Поступила 10.06.2003