

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ

This work represents in detail the influence of the basic technological parameters on the process of polycondensation, and also shows the selected control channels, in accordance with which the present studies are conducted. The procedure of the experiment on receiving the dynamic behaviors, according to the selected control channels, is developed. The reaction of the system to the supply of the disturbing effect according to all control channels is determined. The method, based on the use of Volterra series, has been selected for the identification of the dynamic characteristics of process. This method determines nonlinear objects with the help of the linear characteristics, preserving in this case all inherent properties of linear objects. The structure chart of the control object, which includes basic control channels on the temperature and the pressure in the reactors of preliminary and basic polycondensation, has been determined according to the obtained structure of the Volterra series.

Введение. Процесс поликонденсации является завершающей стадией в производстве полимера полиэтилентерефталата, используемого в дальнейшем для промышленных и бытовых нужд. Именно на данной стадии расплав полимера приобретает необходимую молекулярную массу. После поликонденсации полимер пропускают через фильеры, охлаждают и режут на так называемую полимерную крошку.

Основной величиной, «отвечающей» за качество полимера, является его вязкость. Преимущественно на изменение вязкости оказывает воздействие изменение давления и температуры внутри реактора.

Целью данного исследования является получение математической модели, с помощью которой можно определить в аналитической форме влияние основных параметров на вязкость расплава полимера. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выделить основные каналы управления реакторами поликонденсации;
- 2) разработать методику по снятию динамических характеристик, согласно каналам управления;
- 3) провести эксперимент и обработать полученные данные;
- 4) выбрать наиболее приемлемый для данного процесса метод идентификации динамических характеристик;
- 5) определить структуру объекта управления и сделать заключение о соответствии построенной модели объекта реальному процессу.

В ходе решения поставленных задач возникает сложность не только в проведении эксперимента, а именно во внесении возмущающих воздействий на реально действующих установках, но и в выборе наиболее соответствующего способа идентификации динамических характеристик.

Основная часть. Из полученных ранее и опубликованных в литературе данных известны основные параметры, влияющие на вязкость полимера. В соответствии с этими данными и выделяют каналы управления объектом. Про-

ведение эксперимента заключается в нанесении искусственного возмущения входной координате $x(t)$ и в регистрации изменений выходного параметра $y(t)$.

Экспериментальный метод определения динамических характеристик основан на трех основных предположениях:

- исследуемый объект есть система с сосредоточенными параметрами;
- при незначительных возмущающих воздействиях $x(t)$ изменения выходной координаты удовлетворяют принципу суперпозиции;
- динамические свойства изучаемого объекта неизменны во времени.

Справедливость второго и третьего предположений может быть проверена при экспериментальном исследовании динамики объекта. Все реальные химико-технологические аппараты и установки являются системами с распределенными в пространстве параметрами, поэтому первое предположение есть идеализация свойств объекта (упрощение поставленной задачи).

Влияние распределенности параметров будем учитывать введением элемента задержки при аппроксимации переходного процесса $y(t)$. В случае процесса поликонденсации выделим следующие каналы управления в предварительном реакторе, учитывая, что главной выходной величиной (определяющей качество полимера) является вязкость расплавленного полиэтилентерефталата:

- 1) регулирование давления в реакторе предварительной поликонденсации. Процесс изменения величины давления внутри реактора осуществляется увеличением/уменьшением расхода азота. Схема процесса представлена на рис. 1.

При увеличении расхода азота растет количество отгоняемого этиленгликоля в реакторе, тем самым давление в реакторе повышается по абсолютной величине (сравливание вакуума).

Сокращение расхода азота приводит к уменьшению абсолютной величины давления в реакторе (заглубление вакуума). В первом случае вязкость расплава снижается, во втором – увеличивается.

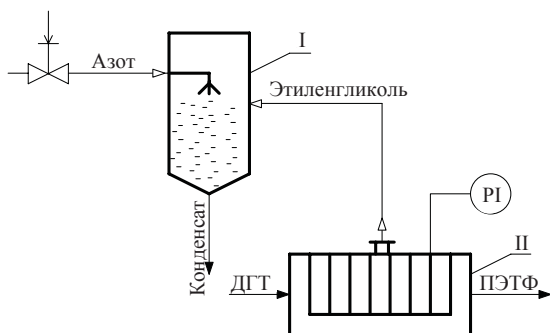


Рис. 1. Схема регулирования давления в реакторе предварительной поликонденсации:
I – скруббер; II – реактор предварительной поликонденсации

При значительном увеличении/уменьшении давления в реакторе предварительной поликонденсации наблюдается изменение давления в основном реакторе;

2) регулирование температуры в реакторе предварительной поликонденсации. Данный процесс осуществляется путем изменения расхода греющего пара, который поступает в нагревательный аппарат емкости нагрева динила (рис. 2).

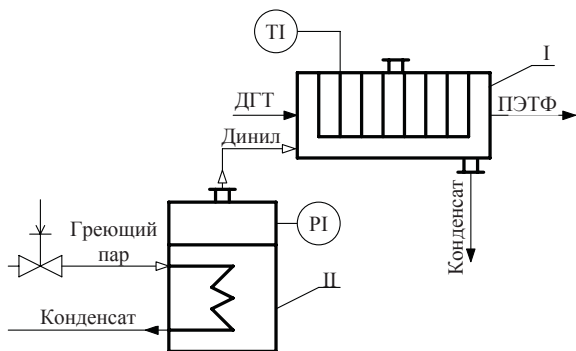


Рис. 2. Схема регулирования температуры в реакторе предварительной поликонденсации:
I – реактор предварительной поликонденсации;
II – емкость нагрева динила

При увеличении расхода греющего пара температура динила внутри емкости повышается, в результате чего происходит интенсивное испарение динила, и как следствие, увеличение давления паров динила в емкости нагрева. Изменение давления парообразного динила, обогревающего рубашку реактора предварительной поликонденсации, приводит к изменению температуры расплава, находящегося внутри реактора. Вязкость расплава в этом случае повышается.

Необходимо отметить, что при изменении вышеуказанного параметра в реакторе предварительной поликонденсации происходит и режимное изменение в реакторе основной поликонденсации.

После того, как определены основные каналы управления объектом, приступаем к проведению эксперимента.

Перед началом опыта на объекте устанавливается рабочий режим, стабилизируются основные источники возмущений и проверяется правильность включения регистрирующей аппаратуры.

При снятии переходных функций $y(t)$ испытательный сигнал $x(t) = A$ наносят вручную или с помощью исполнительного механизма резким изменением положения регулирующего органа.

Возмущение наносится в момент времени, принятый за нулевой, когда

$$y(0) = \text{const}, \dot{y}(0) = 0, \ddot{y}(0) \approx 0.$$

Регистрация изменений координаты $y(t)$ прекращается после того, как, начиная с некоторого момента времени $t = T_y$, установятся значения $y(t) = \text{const}$.

На рис. 3 показан график изменения вязкости в реакторе предварительной поликонденсации при изменении давления внутри реактора.

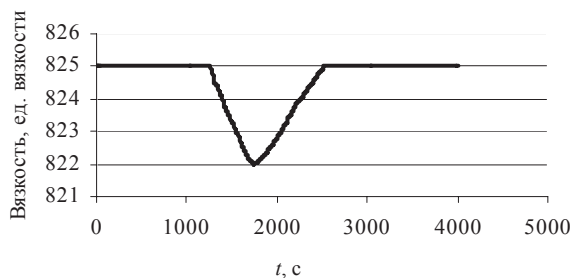


Рис. 3. График изменения вязкости в реакторе предварительной поликонденсации по каналу «давление – вязкость»

На рис. 4 представлен график изменения вязкости в реакторе предварительной поликонденсации по каналу «температура – вязкость».

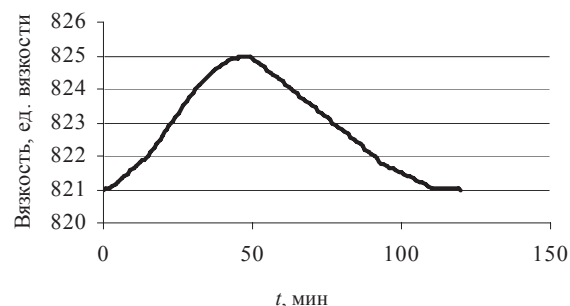


Рис. 4. График изменения вязкости в реакторе предварительной поликонденсации по каналу «температура – вязкость»

Запаздывание в изменении вязкости незначительное по сравнению с каналом «давление – вязкость», так как скорость изменения вязкости происходит соизмеримо со скоростью изменения температуры.

На этапе снятия динамических характеристик частично проверяются предположения о линейности и стационарности динамических свойств объекта. Для этого по всем экспериментальным кривым $y(t)$ вычисляются коэффициенты усиления $k = y(T_y) / A$ и сравниваются между собой для случая, когда не производилась линеаризация статической характеристики. Помимо этого, сравниваются соответствующие ординаты (точнее, их абсолютные значения) переходных функций, полученных при воздействиях $+A$ и $-A$, а также проверяется выполнение принципа суперпозиции для кривых $y(t)$, снятых при сигналах $\pm A$.

При существенном различии коэффициента усиления (абсолютных величин ординат $y(t)$ или при значительном нарушении принципа суперпозиции) требуется уменьшить амплитуду испытательного воздействия и провести опыт повторно [1].

Обработка экспериментальных кривых $y_\beta(t)$ ($\beta = 1, 2, \dots, z$), снятых при различных испытательных сигналах A_β , начинается с их усреднения:

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{z} \sum_{\beta=1}^z \frac{y_\beta(t)}{A_\beta}. \quad (1)$$

Далее из функции $\bar{y}(t)$, полученной по формуле (1), выделяется время «чистого» запаздывания, определяемое как отрезок времени, во всех точках которого выполняется неравенство $0 \leq y(t) \leq \Delta$, где Δ – погрешность измерения координаты $y(t)$.

В ходе проведения эксперимента было выяснено, что модель объекта управления (реактора поликонденсации) является нелинейной.

В результате проведения эксперимента были получены данные о возмущающем (входном) воздействии и реакции системы на это воздействие (выходной величине). Таким образом, имея только вышеуказанную информацию, необходимо построить такую модель, чтобы определяющая ее функция была хорошей аналитической аппроксимацией выходной величины.

Оптимальным представляется описание нелинейного объекта с помощью линейных по параметрам моделей, так как линейным объектам присущи следующие свойства:

- возможность явно записать связь между входом и выходом;
- простота описания соединений системы;
- возможность рассмотрения случайных сигналов.

Вышеизложенные свойства необходимо сохранить и для нелинейных объектов [2]. Для этого воспользуемся разложением Вольтерра.

Используя ряды Вольтерра, ядра которых представляют собой весовые функции высших порядков, можно получить описание нелиней-

ного объекта, допускающее ясную физическую интерпретацию. Этот метод имеет большое достоинство, связанное с тем, что нелинейная система рассматривается как непосредственное обобщение линейного случая, хотя сам объект может существенно отличаться от линейного. Иначе говоря, метод с использованием рядов Вольтерра интерпретирует линейные объекты как подкласс нелинейных объектов [3].

Суть метода заключается в том, что при имеющихся входных $x(t)$ и выходных данных $y(t)$ необходимо подобрать, используя разложение Вольтерра, такую зависимость $\bar{y}(t)$, которая являлась бы хорошей аппроксимацией $y(t)$.

В первом приближении ограничимся $y_{\text{лин}}(t)$:

$$y_{\text{лин}}(t) = h_1 x_1 \Delta t + h_2 x_2 \Delta t + \dots = \sum_{i=1}^N h_i x_i \Delta t, \quad (2)$$

где h_i – амплитуда; x_i – входная величина; Δt – ширина импульса.

При условии

$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \sum_{i=1}^N h_i x_i \Delta t = \int_0^t h_1(\tau) x(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

где τ – сдвиг по времени, имеем следующее выражение:

$$y_{\text{лин}}(t) = \int_0^t h_1(\tau) x(t - \tau) d\tau. \quad (4)$$

При подаче на объект двух импульсов входных сигналов x_i и x_j вид линейного члена разложения (в пределе $\Delta t \rightarrow 0$, $N \rightarrow \infty$) будет следующим:

$$y_{\text{квадр}}(t) = \int_0^t \int_0^t h_2(\tau_1, \tau_2) x(t - \tau_1) x(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \quad (5)$$

Таким образом, получим, что

$$\bar{y}(t) = y_{\text{лин}}(t) + y_{\text{квадр}}(t). \quad (6)$$

В формулу (6) выражения для слагаемых подставляются из уравнений (4) и (5) соответственно.

Следовательно, разложение в ряд Вольтерра является непосредственным обобщением модели линейного объекта в форме интеграла свертки. Весовая функция $h(\tau)$ линейной системы заменяется весовыми функциями (ядрами) [4].

Таким образом, главной задачей является определение аналитического вида ядер $h_1(\tau)$ и $h_2(\tau_1, \tau_2)$, а также параметризация $\bar{y}(t)$ относительно $y(t)$.

В качестве ядер интегралов будем использовать весовые функции основных динамических

звеньев: интегрирующего, дифференцирующего, апериодического звена второго порядка, усиительного, интегрирующего.

Оценку точности выбранного для аппроксимации выражения будем проводить исходя из условия

$$(y(t) - \bar{y}(t))^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Другими словами, квадрат разности между экспериментально полученными значениями точек и значениями, полученными аналитическим путем, должен стремиться к минимуму (обозначим данное выражение через ϕ).

Наиболее точная аппроксимация ($\phi = 0,93$) осуществляется, когда в качестве ядра интеграла Вольтерра принято апериодическое звено второго порядка. Исследуем также и произведение интегралов Вольтерра первого рода и при этом учтем, что данное произведение является интегралом Вольтерра второго рода [1].

На рис. 5 представлена аппроксимация выходной величины рядом Вольтерра второго порядка, в качестве ядра которого принято произведение апериодического звена первого порядка и апериодического звена второго порядка.

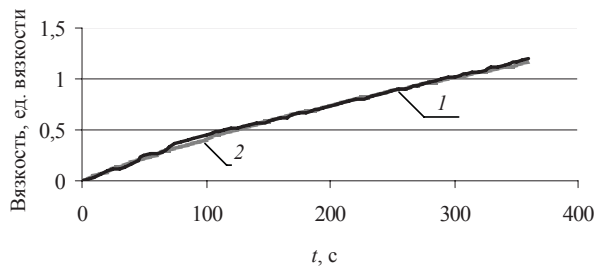


Рис. 5. Аппроксимация выходных данных рядом Вольтерра второго порядка по каналу «давление – вязкость»:
1 – зависимость, полученная опытным путем;
2 – зависимость, полученная аналитически

Точность аппроксимации $\phi = 0,033$.

Распределенность параметров будем компенсировать введением звена чистого запаздывания. Таким образом, функция, которой осуществляется аппроксимация выходных данных, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{y}_1(t) = & \int_0^t \delta(t-22)x_1(\tau)d\tau + 0,98 \int_0^t \int_0^t e^{-33\tau} \times \\ & \times (1,94e^{-0,0022t} - 2,8e^{-0,0035t})x_1(t-\tau_1) \times \\ & \times x_1(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогичным образом проводится аппроксимация данных и по каналу «температура –

вязкость» (рис. 6). Ядром ряда Вольтерра является произведение апериодического звена второго порядка на интегрирующее звено. Данный вид ядра выбран потому, что установленная точность аппроксимации $\phi = 1,144$ при его использовании является наиболее высокой.

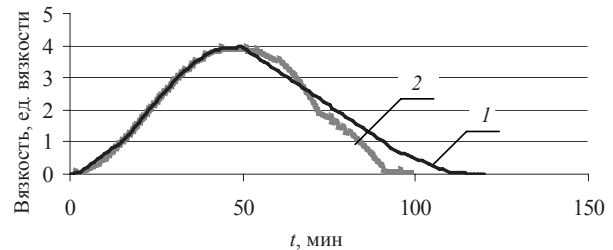


Рис. 6. Аппроксимация выходных данных рядом Вольтерра второго порядка по каналу «температура – вязкость»:
1 – зависимость, полученная опытным путем;
2 – зависимость, полученная аналитически

Вид ряда Вольтерра следующий:

$$\begin{aligned} \bar{y}_2(t) = & \int_0^t \delta(t-14)x_2(\tau)d\tau + 1,104 \times \\ & \times \int_0^t \int_0^t (e^{-0,002t} - e^{-0,003t})x_2(t-\tau_3) \times \\ & \times x_2(t-\tau_4)d\tau_3d\tau_4. \end{aligned} \quad (9)$$

Заключение. Таким образом, при использовании вышеуказанной методики были определены с высокой точностью аналитические зависимости (8) и (9). Данные зависимости являются математической интерпретацией динамических характеристик процесса поликонденсации по каналам управления «давление – вязкость» и «температура – вязкость».

Литература

1. Построение математических моделей химико-технологических объектов / Е. Г. Дудников [и др.]. – СПб.: Химия, 1970. – 312 с.
2. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 684 с.
3. Zadeh, L. A. Output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) / L. A. Zadeh // Time-Varying Networks. – 1961. – № 4. – P. 1488–1503.
4. Bedrosian, E. Output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic und Gaussian inputs / E. Bedrosian, S. O. Rice // Time-Varying Networks. – 1971. – № 2. – P. 1688–1707.