

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПУСКА И ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

А.Э. Софиев, И.А. Янкина

*Кафедра «Техническая кибернетика и автоматика»,
ГОУ ВПО «Московский государственный университет
инженерной экологии»; yankina.irina@gmail.com*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: полимеризационный реактор; пуск; устойчивость.

Аннотация: Рассмотрено применение анализа устойчивости объекта для осуществления противоаварийной защиты при проведении пуска химического реактора непрерывного действия в производстве полиэтилена высокого давления.

Обозначения

A_i – предэкспоненциальный множитель реакции инициирования, $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$;	M_0 – начальная концентрация мономера, $\text{кг}/\text{м}^3$;
A_o – предэкспоненциальный множитель реакции обрыва цепи, $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$;	P – давление, Па;
A_p – предэкспоненциальный множитель реакции роста цепи, $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$;	Q_p – тепловой эффект реакции, Дж/моль;
c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);	R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
E – общая энергия активации, Дж/моль;	T – температура в реакторе, °С;
E_i – энергия активации реакции инициирования, Дж/моль;	T_0 – температура на входе в полимеризационный реактор, °С;
E_o – энергия активации реакции обрыва цепи, Дж/моль;	ΔV_a – объем активации, Дж/(Па·моль);
E_p – энергия активации реакции роста цепи, Дж/моль;	ΔV_a^i – объем активации реакции инициирования, Дж/(Па·моль);
I_0 – начальная концентрация инициатора, $\text{кг}/\text{м}^3$;	ρ – плотность реакционной смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$;
	τ – время пребывания в реакторе, ч.

Химические реакторы являются основным оборудованием в технологических схемах получения многих веществ. Особенностью экзотермических химических реакторов непрерывного действия является наличие неустойчивого состояния системы [1]. Эта особенность является определяющей для процессов, протекающих с наибольшей эффективностью именно в неустойчивых режимах. Возможность нормального функционирования подобных систем в неустойчивом режиме обеспечивают системы автоматического регулирования.

Однако перед включением системы автоматического регулирования необходимо вывести объект в рабочий режим, что осуществляется в процессе пуска (или останова) реактора.

Задача исследования устойчивости экзотермических химических реакторов появляется на различных стадиях создания как технологического процесса, так и системы управления реакторами (рис. 1). К таким задачам относятся: конструиро-

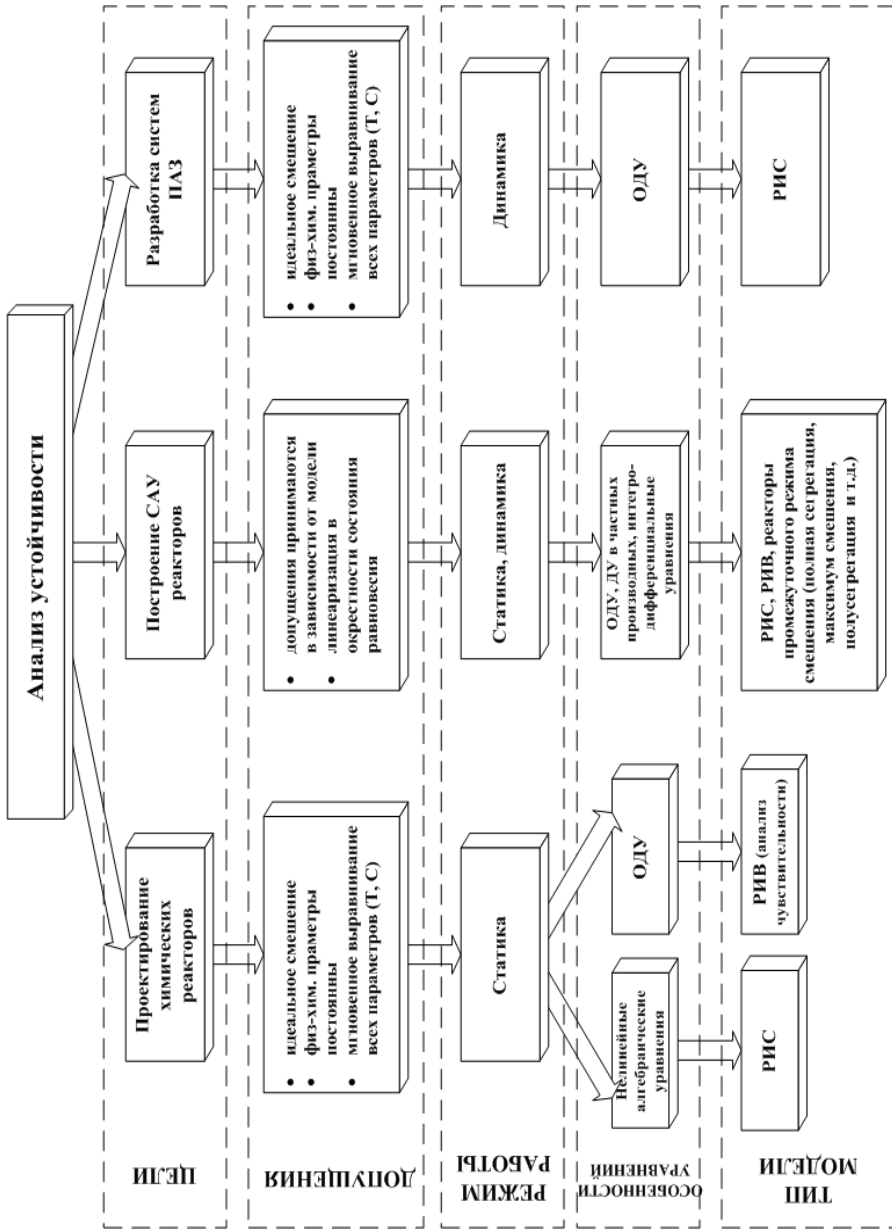


Рис. 1. Применение анализа устойчивости при исследовании химических реакторов

вание химических реакторов, построение систем автоматического управления и противоаварийной защиты. При проектировании реакторов с помощью анализа устойчивости решается задача выбора оптимальных геометрических размеров реактора [2]. Анализ устойчивости позволяет решить задачу выбора структуры системы автоматического управления: организовать управление по принципу обратной связи или выбрать более подходящий для данного объекта тип регулирования, например, стабилизацию неустойчивого режима в полимеризационном реакторе с помощью периодических пульсаций управляющего параметра [3].

Во всех указанных случаях при исследовании устойчивости используется математическая модель химического реактора. В зависимости от вида решаемой задачи применяются модели, получаемые при разных допущениях.

Так как основной режим функционирования химических реакторов – установившийся, поэтому для решения задач, связанных с оптимальным проектированием реактора, используют модели статики. Данные модели описываются системой нелинейных алгебраических уравнений в случае допущения о реакторе идеального смешения или системой обыкновенных дифференциальных уравнений – в случае реактора идеального вытеснения. При построении систем автоматического управления и противоаварийной защиты используют как модели статики, так и модели динамики, например, при построении систем управления работой периодических реакторов. С помощью моделей статики исследуют область устойчивости системы, что также необходимо при построении систем противоаварийной защиты химического реактора, так как помогает выявить граничные значения параметров процесса, при достижении которых система выйдет в неустойчивое состояние [4].

Процесс полимеризации этилена под высоким давлением относится к числу наиболее опасных технологических процессов. Данный процесс протекает в автоклавном реакторе непрерывного действия и характеризуется высоким рабочим давлением, достигающим 150 МПа, и температурой, рабочие значения которой находятся в интервале от 240...270 °С. Поэтому задача построения алгоритмов управления пуском и противоаварийной защиты полимеризационного реактора является актуальной.

Ввиду сложности рассматриваемого в качестве объекта управления реактора полимеризации этилена под высоким давлением используются методы математического моделирования для его исследования. Процесс полимеризации этилена под высоким давлением в автоклавном реакторе является хорошо изученным объектом, важнейшие результаты которого приведены в работах P.J. Hoftyzer, T.N. Zwietering, Б.В. Вольтер, М.Г. Слинько.

Ранее была предложена последовательность пуска полимеризационного реактора, показанная на рис. 2 [5]. Данная последовательность пуска основана на применении математической модели реактора полимеризации этилена под высоким давлением.

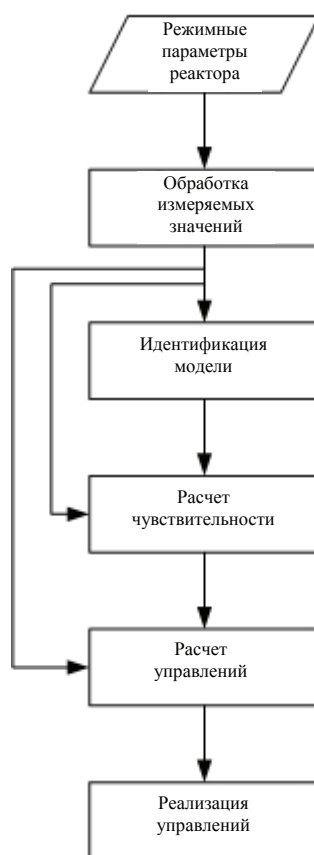


Рис. 2. Блок-схема пуска полимеризационного реактора

В качестве математической модели используем модель следующего вида:

$$\frac{dI}{dt} = -A_i M_0 I e^{-\frac{(E_i + \Delta V_a^i P)}{RT}} + \frac{1}{\tau} (I_0 - I); \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_p A_p}{\rho c_p} \left(\frac{A_i}{A_0} \right)^{0,5} M_0^{1,5} I^{0,5} e^{-\frac{(E + \Delta V_a P)}{RT}} + \frac{1}{\tau} (T_0 - T). \quad (2)$$

Уравнения материального баланса по инициатору (1) и теплового баланса (2) описывают модель идеального смешения, получаемую при допущениях о постоянстве физико-химических параметров процесса (таких, как теплоемкость и плотность), квазистационарном протекании процесса и равенстве начальной и текущей концентраций продукта в реакторе вследствие малой степени превращения этилена в полиэтилен (примерно 10 %), а также отсутствии теплообмена с рубашкой реактора (вследствие толщины стенки порядка 20 см).

Существенной особенностью пускового режима непрерывного полимеризационного реактора является наличие гистерезиса – скачкообразного изменения температуры в реакторе, приводящего, в большинстве случаев, к срабатыванию аварийной защиты или взрыву реактора или, наоборот, к резкому снижению температуры и, как следствие, гашению реакции.

Наличие гистерезиса было выявлено с помощью статической характеристики полимеризационного реактора [6], приведенной на рис. 3.

Для своевременного обнаружения и предупреждения аварийных ситуаций во время пуска реактора предлагается дополнить алгоритм пуска проверкой устойчивости системы (рис. 4).

Текущие данные о состоянии процесса, а именно: температура, давление, расход инициатора в реактор (концентрация инициатора в реакторе), поступают на вход алгоритма и используются для идентификации статической математической модели реактора $T = f(T_0)$, получаемой из уравнений (1), (2) при

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dT}{dt} = 0.$$

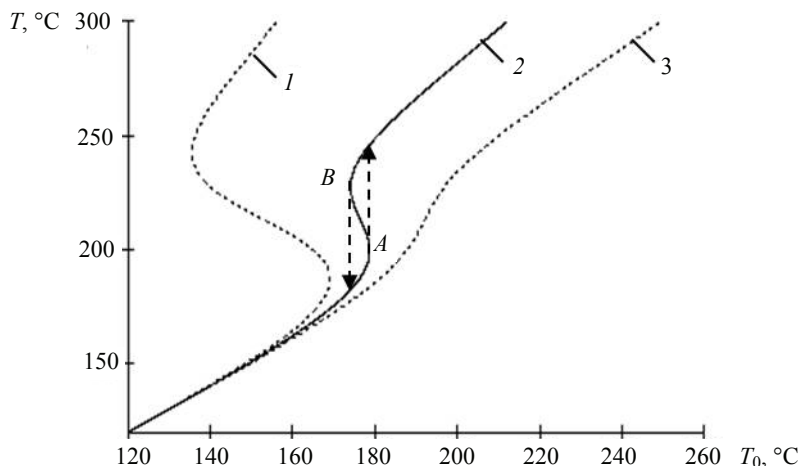


Рис. 3. Статическая характеристика полимеризационного реактора [4, 6] при различных значениях начальной концентрации инициатора, I_0 , кг/м³:
1 – 0,08; 2 – 0,03; 3 – 0,01

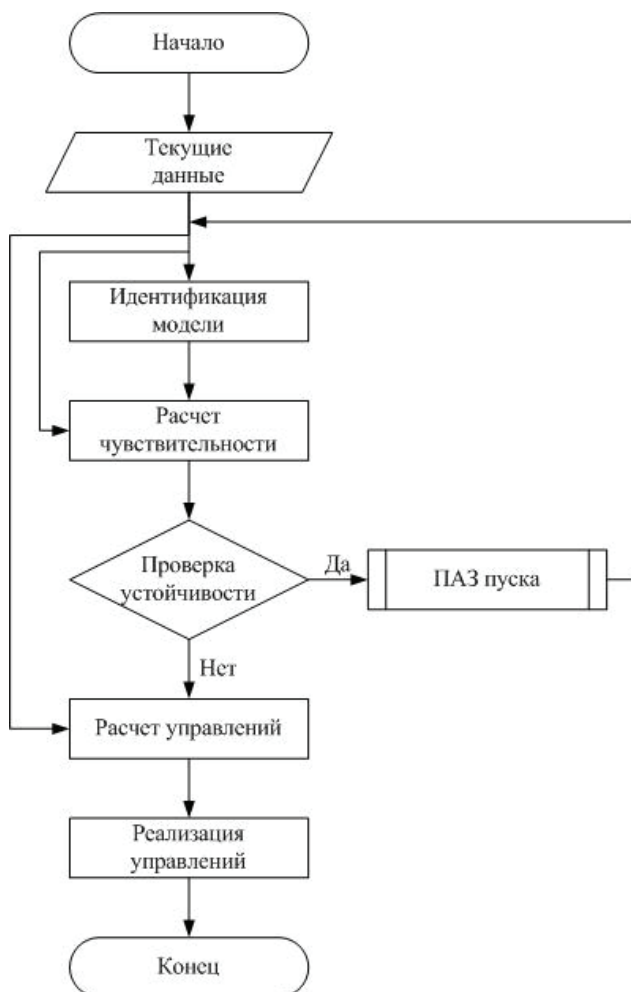


Рис. 4. Алгоритм пуска реактора полимеризации этилена на основе анализа устойчивости объекта

На следующем шаге рассчитываются функции чувствительности по основным управляющим параметрам (начальной температуре T_0 , начальной концентрации инициатора I_0 , давлению P): $S_j = \frac{\partial f(T_0)}{\partial a_j}$; где a_j – вектор управляющих параметров.

После чего осуществляется сравнение значений производных, полученных на текущем и предыдущем шаге с целью выявления бифуркационного состояния системы (точки A или B на рис. 3). Если $\left(\frac{\partial T}{\partial T_0}\right)_k \gg \left(\frac{\partial T}{\partial T_0}\right)_{k-1}$, следова-

тельно система находится в окрестности точки бифуркации, что характеризуется как предаварийное состояние вследствие возможной потери устойчивости системы. В этом случае включается процедура противоаварийной защиты реактора, в ходе которой выполняются следующие действия: определение расхода инициатора на входе в реактор (кривые 1, 3, рис. 3), изменяющего концентрацию инициатора в реакторе; перевода системы в дремлющий режим путем снижения давления в реакторе до 100 МПа или выброс содержимого реактора в атмосферу и аварийный останов реактора.

В случае неравенства нулю значения производной по температуре от статической характеристики реактора и отсутствия предаварийного состояния реактора осуществляется расчет пусковых управлений с учетом заданных технологических ограничений и реализация этих управлений на объекте.

Таким образом, на основе использования математической модели был предложен алгоритм управления пуском полимеризационного реактора в производстве полиэтилена высокого давления. Использование математической модели позволило учесть особенности переходных режимов автоматизируемого объекта.

Применение системы управления пуском реактора, построенной на основе приведенного алгоритма, позволяет снизить время вывода реактора на рабочие значения параметров процесса за счет уменьшения времени простоя реакторного блока в результате попадания в неустойчивые режимы по время пуска реактора. Кроме этого, использование данного алгоритма пуска и противоаварийной защиты реактора позволяет уменьшить потери сырья (сброс в атмосферу в результате срабатывания аварийной защиты) и исключить аварийные ситуации в процессе пуска.

Список литературы

1. Арис, Р. Анализ процессов в химических реакторах / Р. Арис. – М. : Химия, 1967. – 328 с.
2. Янкина, И.А. Конструирование нефтехимического реактора на основе математического моделирования (на примере реактора полимеризации этилена) / И.А. Янкина, М.Г. Беренгартен, А.Э. Софиев // Нефтехим. и газ. машиностроение. – 2010. – № 7. – С. 18–20.
3. Софиев, А.Э. Вибрационная стабилизация неустойчивого режима химического реактора с перемешиванием / А.Э. Софиев, А.М. Трахтенберг // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23, № 5. – С. 644–650.
4. Вольтер, Б.В. Устойчивость режимов работы химических реакторов / Б.В. Вольтер, И.Е. Сальников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1981 – 200 с.
5. Вольфсон, С.А. Расчеты высокоэффективных полимеризационных процессов / С.А. Вольфсон, И.С. Ениколопян. – М. : Химия, 1980. – 312 с.
6. Голованов, О.В. О гистерезисе в статической характеристике процесса полимеризации этилена / О.В. Голованов, А.Э. Софиев // Тр. Центр. науч.-исследов. ин-та комплексной автоматизации. – 1964. – Вып. 10. – С. 232–236.

Application of Mathematical Modeling for Start-up Algorithm and Emergency Protection of Chemical Reactors

A.E. Sofiev, I.A. Yankina

*Department of Technical Cybernetics and Automation,
Moscow State University of Environmental Engineering;
yankina.irina@gmail.com*

Key words and phrases: polymerization reactor; start-up; stability.

Abstract: The paper considers the application of stability analysis of the object for the emergency protection during start-up of a chemical reactor of continuous action in the production of high-pressure polyethylene.

Anwendung der mathematischen Modellierung für den Bau der Algorithmen der Inbetriebnahme und des Notschutzes der chemischen Reaktoren

Zusammenfassung: Es ist die Anwendung der Analyse der Standfestigkeit des Objektes für die Verwirklichung des Notschutzes bei der Durchführung der Inbetriebnahme des chemischen Reaktors des ununterbrochenen Funktionierens bei der Produktion des Polyäthylens des Hochdruckes betrachtet.

Application du modélage mathématique pour l'algorithme du lancement et de la sécurité anti-avarie des réacteurs chimiques

Résumé: Est examinée l'application de l'analyse de la stabilité de l'objet pour la réalisation de la sécurité anti-avarie lors du lancement du réacteur chimique de l'action continue dans la production du polyéthylène de la haute pression.

Авторы: *Софиев Александр Эльхананович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и автоматика»; *Янкина Ирина Аркадьевна* – аспирант кафедры «Техническая кибернетика и автоматика», ГОУ ВПО «Московский государственный университет инженерной экологии», г. Москва.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».
