

На правах рукописи



Сафин Марат Абдулбариевич

**Разработка системы автоматического
управления реактором синтеза
суспензионной полимеризации стирола
с учетом кинетики процесса**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка; биотехнология)

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедрах «Автоматизация производственных процессов» и «Производство и переработка полимерных материалов» Новомосковского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный кандидат технических наук, доцент
руководитель: **Лопатин Александр Геннадиевич**, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Новомосковский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Официальные доктор технических наук, профессор
оппоненты: **Магергут Валерий Залманович**, профессор кафедры технической кибернетики института информационных технологий и управляющих систем, ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»

доктор технических наук, профессор
Баранов Дмитрий Анатольевич, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии, ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»**

Защита состоится «19» марта 2015 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.03 при РХТУ им. Д. И. Менделеева по адресу 125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале университета (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru>.

Автореферат диссертации разослан « » 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.204.03



Женса А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Химические реакторы являются основным оборудованием в технологических схемах по производству полимеров. Особенностью экзотермических реакторов-полимеризаторов периодического действия является наличие неустойчивого состояния работы систем автоматического регулирования. 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.

Вопросами управления процессами полимеризации занимались ведущие ученые: Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Софиев А.Э. и другие.

Особенностью процесса суспензионной полимеризации стирола (СПС) является сложное сочетание химических и сопровождающих их физических явлений, находящихся во взаимной связи и зависимости друг от друга. При суспензионной полимеризации стирола вязкость капель значительно возрастает, изменяется их физическое состояние от жидкости к твердому телу, существенно изменяется тепловая и гидродинамическая обстановка в реакторе. Более того, в этом процессе имеет место динамическая неустойчивость, что иногда приводит к образованию в реакторе одной большой капли твердого полимера. Отличительной особенностью кинетики этого процесса является наличие гель-эффекта влияющего на степень полимеризации стирола.

Одним из факторов, определяющих эффективность функционирования периодических производств, является длительность технологической стадии, которая, в свою очередь, складывается из времени элементарных технологических операций. Задача оптимизации элементарных технологических операций решается на нижнем уровне иерархии с применением систем управления. Для синтеза систем управления необходимо наличие математической модели, включающей в себя кинетику процесса СПС и тепловой баланс периодического реактора, которые являются основой для расчета высокоэффективных процессов, масштабного перехода, выбора конструкций и режима работы реактора, поддержания оптимальных режимов функционирования реактора с помощью выбора соответствующих каналов управления и эффективного вмешательства в ход процесса.

Цель диссертационной работы: разработка системы автоматического управления реактором синтеза СПС с использованием кинетики процесса. Для достижения указанной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) создание физической модели процесса СПС;
- 2) проведение исследований процесса СПС, при различных режимах работы реактора;
- 3) разработка математической модели реактора синтеза полистирола;
- 4) разработка алгоритмического и программного обеспечения автоматической системы управления реактором синтеза СПС.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие основные результаты, характеризующиеся научной новизной:

1) определено, что на липкой стадии процесса СПС при вращении мешалки реактора величина диссипации энергии имеет существенное влияние на тепловой баланс реактора;

2) введен контур автоматического управления скоростью вращения мешалкой для предотвращения коагуляции процесса СПС в период липкой стадии;

3) разработана система автоматического управления реактором синтеза СПС с учетом кинетики процесса;

4) создана физическая модель для исследования тепловых режимов работы периодического реактора-полимеризатора;

5) получено описание динамики процессов синтеза СПС, отличительной особенностью которого является возможность оперативного определения сворачиваемости полимера в монолитный блок;

6) разработано алгоритмическое и программное обеспечение системы автоматического управления процессом СПС.

Практическая значимость работы. Разработана автоматическая система управления процессом СПС при помощи программного комплекса для исследования динамики процессов полимеризации, который позволяет проводить исследование процесса при различных рецептурах загрузки и различных тепловых режимах, а также может быть использован в промышленности, в научных исследованиях и в учебном процессе. Автоматическая система управления СПС позволяет наблюдать отклонения величин, характеризующих процесс полимеризации (температура внутри реактора, степень превращения мономера и т.д.), и заблаговременно корректировать управляющие переменные (скорость вращения мешалки реактора) для более качественного регулирования, а также для предотвращения сворачивания полимера.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач в работе использовались теория дифференциальных уравнений, теория

устойчивости, теория автоматического управления, методы математического моделирования химико-технологических систем, теория химической кинетики. При синтезе законов управления и моделировании замкнутых систем использовались прикладные математические пакеты Matlab (линейная алгебра, численные методы, динамические системы и т. д.), а для реализации разработанных алгоритмов управления SCADA система CoDeSys, на базе языков программирования современных контроллеров стандарта МЭК 6-1131/3.

Достоверность полученных результатов подтверждается проверкой адекватности разработанной автоматической системы управления процессом СПС, практической применимостью созданного методического обеспечения, включающего программы и алгоритмы для решения разнообразных задач компьютерного моделирования процесса СПС, а также многочисленными экспериментами на физической модели процесса СПС. Результаты позволяют сделать вывод о работоспособности разработанной системы автоматического управления.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры автоматизация производственных процессов Новомосковского института (филиала) Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева (2008 - 2012 г.г.); на XXIV международной научной конференции Математические методы в технике и технологиях – ММТТ 24 (Пенза, 2011), на XIII и XIV научно-технических конференциях молодых ученых, аспирантов, студентов (Новомосковск, 2011, 2012); на XXVIII научной конференции профессорско-преподавательского состава и сотрудников НИ РХТУ им. Д. И. Менделеева (Новомосковск, 2012).

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах реализации диссертационной работы:

- в разработке и создании физической модели процесса СПС;
- моделировании кинетики процесса полимеризации стирола;
- в проведении большого количества экспериментов с помощью физической модели СПС и их обработке;
- разработке программного обеспечения по управлению процессом полимеризации;
- в подготовке материалов для научных публикаций и докладов для выступлений на конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, в частности 4, рекомендованных ВАК, а также получен патент и свидетельство на электронный ресурс.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 124 страницах, включает 47 рисунков; состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований и 2 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования.

В первой главе проведён анализ процесса суспензионной полимеризации стирола и произведена постановка задачи управления.

В полимеризационных реакторах особенно важной является динамика измерения тепловых потоков в реакционном объёме. Теплообмен в таких аппаратах затруднен, так как вязкость реагирующих сред является переменной величиной в ходе полимеризации и по мере накопления продуктов реакции достигает высоких значений (до 10^4 Па \times с), вследствие чего меняется инерционность процесса. Современные реакторы, объёмом 10 и 50 м³ обладают высокой инерционностью и не стационарностью протекания процессов, поэтому достичь необходимого качества управления температурой не всегда удаётся.

Существующие системы автоматического управления процессом СПС обеспечивают, как правило, стабилизацию температуры внутри реактора-полимеризатора изменением подачи теплоносителя или хладагента в рубашку реактора, что приводит к образованию холодных и теплых зон внутри реактора. При данном способе управления процессом отсутствует возможность влияния на температуру с помощью изменения гидродинамического режима внутри реактора. Учитывать это влияние необходимо, так как при применении аппаратов с мешалками увеличение скорости вращения мешалки реактора при значительной вязкости реакционных сред приводит как к значительному росту мощности, потребляемой мешалкой, так и к опасности локального перегрева самой реакционной массы за счёт трения слоев вязкой среды, что снижает качество получаемого продукта.

В качестве задачи управления предлагается ввести контур регулирования скорости вращения мешалки реактора, который будет поддерживать необходимую скорость в конкретные периоды реакции полимеризации, просчитанные по модели.

Во второй главе проведено исследование процесса СПС на разработанной физической модели.

Разработанная физическая модель по изучению динамических характеристик химических процессов состоит из стандартного реактора идеального смешения периодического действия (РИСПД), снабженного двухлопастной мешалкой и устройством электронагрева, с соответствующими датчиками и исполнительными устройствами, а также из центрального пункта управления (ЦПУ).

Функциональная схема автоматизации физической модели представлена на рис. 1.

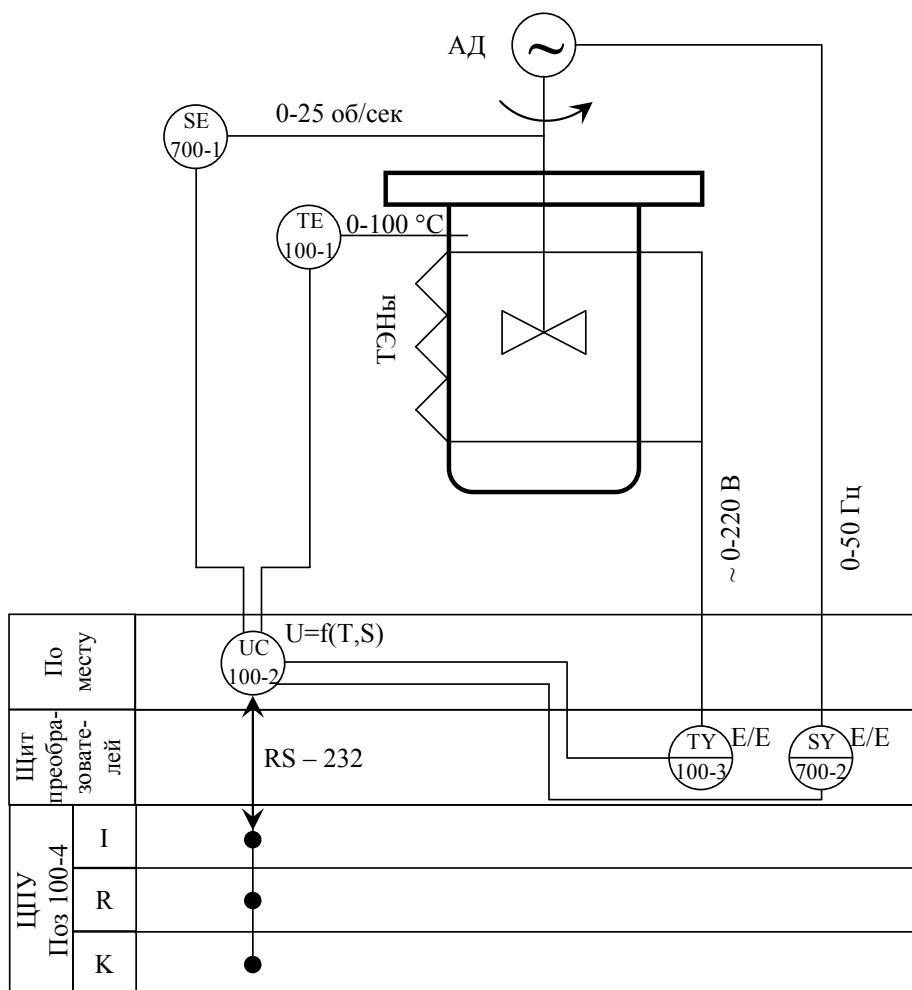


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации физической модели

Система управления реактором состоит из двух контуров. Первый контур реализует стабилизацию заданной температуры реакционной массы, являющейся одним из важных внешних факторов, влияющих на протекание

химической реакции в нужном направлении и с заданной скоростью, второй – стабилизация скорости вращения мешалки.

Отличительной особенностью данной физической модели является возможность использовать в управлении процессом СПС значения мощности не только подводимой или отводимой, но и значения мощности, в каждые моменты времени, выделяемые химической реакцией и выделяемые при перемешивании реакционной среды (при диссипации энергии), вязкость которой значительно меняется в ходе процесса полимеризации, отслеживая это по математической модели процесса СПС работающей параллельно. Учет этих мощностей позволяет вести автоматическое управление процессом полимеризации, учитывая при этом его характерные особенности (например, такие как стадийность, влияние условий протекания процесса на конечный продукт – полимерный бисер (латекс) и т.п.)

Для исследования динамики процесса СПС проведен ряд экспериментов с различными условиями загрузки компонентов: соотношение вода:мономер (В:М), стабилизатор:мономер (Ст:М), (в качестве стабилизатора взят раствор поливинилового спирта (ПВС) 1%-ый), инициатор:мономер (Ин:М); при температурах в 80, 85, 90 и 95°C. Разница между опытами заключалась лишь в числе оборотов: положительный исход процесса (опыт с получением бисера) при 14 с^{-1} (840 об/мин), отрицательный (опыт со сворачиванием) – при 18 с^{-1} (1080 об/мин). Математическая модель процесса СПС учитывает соотношения загрузки, температуру и скорость вращения мешалки, тем самым позволяет просчитывать ход процесса при заданных условиях.

Результаты исследования динамики при определенных условиях представлены на рис. 2. Они иллюстрируют два возможных исхода процесса: образование полимерного бисера (кривые $1f$, $1u$) и образование в реакторе одной большой капли полимера, т.е. полного сворачивания дисперсии полимера в реакторе (кривые $2f$, $2u$). На данном рисунке представлены следующие оси: u – напряжение на обмотке реактора, в В; f – частота, подаваемая с ЧРП на электропривод мешалки, в с^{-1} ; t – время, в с.

Из рис. 2 следует ряд нетривиальных выводов. Во-первых, поддержание постоянными температуры и скорости вращения мешалки требует в разные периоды процесса разных значений управляющих величин u и f . В определенный период реакции обнаруживается увеличение потребления энергии на перемешивание (кривая $1f$) и уменьшение затрат на поддержание постоянной температуры (кривая $1u$).

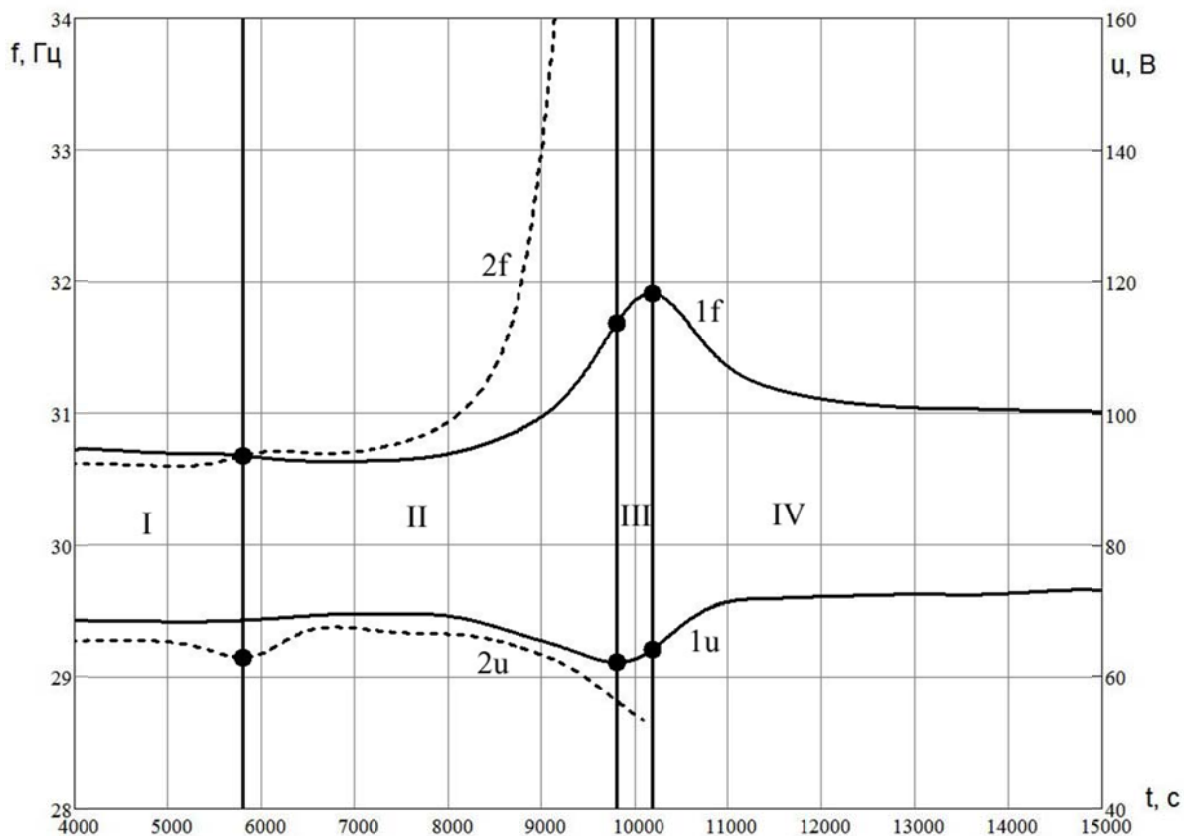


Рис. 2. Кривые изменения управляющих переменных во времени при соотношениях В:М=0.955, Ст:М=0.136, Ин:М=0.0096 и температуре 90°C

Во-вторых, в опыте с полной коагуляцией мощность, требуемая для поддержания постоянной скорости вращения мешалки, вполне предсказуемо увеличивается до максимума. При этом кривая мощности нагрева уменьшается. Это позволяет отнести период существенных изменений в затратах мощности на нагрев и перемешивание к строго определённого периода процесса; а именно, к его так называемой “липкой” стадии. Её физико-химическая суть заключается в том, что, начиная примерно с 60% превращения мономера в полимер, полимерно-мономерные частицы (ПМЧ) постепенно теряют способность к диспергированию (дроблению на более мелкие капли), но сохраняют (а, возможно, и увеличивают) способность к коалесценции (точнее: слипанию и слиянию). Результатом этого является рост среднего диаметра ПМЧ, который, в зависимости от начальных условий, обуславливает два известных конечных результата: образование полимерного бисера с определённым распределением частиц по размерам (РЧР) при нормальном течении процесса, или полной коагуляции.

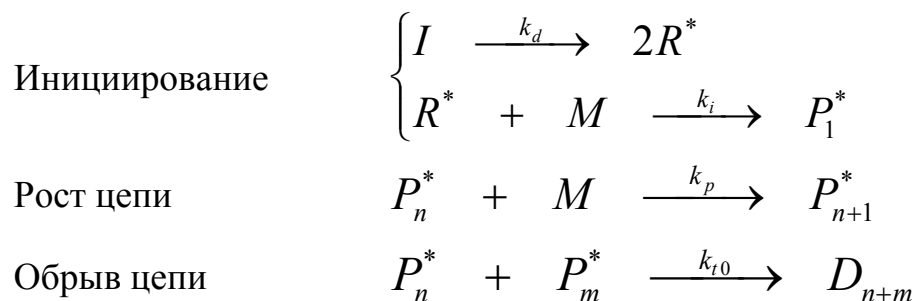
Наконец, в третьих, обращает на себя внимание сложная форма кривой затрат мощности на нагрев реакционной смеси, на которой четко прослеживаются четыре участка. В самом начале реакции (участок I) потребление мощности на нагрев реакционной смеси почти не изменяется во времени. На участке II потребность в нагреве уменьшается с заметным ускорением во времени вплоть до достижения точки минимума, но одновременно отмечается рост потребляемой мощности на перемешивание смеси (кривая 1f). Этот участок соответствует так называемой “липкой” стадии процесса со сложной динамикой роста среднего диаметра ПМЧ и их вязкости. В нормальном процессе зависимость среднего диаметра ПМЧ от времени имеет характерный S-образный вид с перегибом в области “липкой” стадии.

На участке III за короткое, по сравнению с масштабом времени участков I и II, время резко нарастает потребность в дополнительном нагреве. Одновременно растут и затраты энергии на перемешивание. Наконец, участок IV характеризуется падением потребляемой мощности, как на нагрев, так и на перемешивание с выходом на постоянные их значения по завершении реакции.

Таким образом, наблюдаемые экспериментально изменения управляющих величин u и f позволяют понять физико-химическую природу процессов, протекающих в ходе превращения мономера в полимер, а это является необходимым условием автоматического управления процессом СПС.

В третьей главе разработана математическая модель реактора синтеза полистирола. Процесс получения суспензионного полистирола представляет собою сложное сочетание химических и сопровождающих их физических явлений, находящихся во взаимной связи и зависимости друг от друга. Поведение такого рода систем описывается с помощью кинетики процесса.

Кинетическая схема процесса СПС представлена несколькими основными элементарными стадиями:



где I – инициатор; R^* – первичный радикал; M – мономер; P_1^* – макрорадикал с первым мономерным остатком; k_d , k_i – константы скоростей разложения инициатора и начала полимеризации соответственно; P_n^* – макрорадикал с n

мономерными остатками; P_{n+1}^* – макрорадикал с $(n+1)$ мономерными остатками; k_p – константа скорости роста цепи; P_m^* – макрорадикал с m мономерными остатками; D_{n+m} – полимер; k_{t0} – константа скорости обрыва цепи рекомбинацией.

При иницировании лимитирующей является стадия распада инициатора, поэтому в дальнейшем k_i не учитывается.

На основании экспериментальных исследований проведённых на физической модели разработано математическое описание процесса СПС, которое включает в себя кинетическую модель и тепловой баланс реактора:

$$\begin{cases} \frac{dx_m}{dt} = k_{eff} (1 - x_m) \sqrt{\frac{I_0 (1 - x_I)}{(1 + \varepsilon \cdot x_m) F(x_m)}} \\ \frac{dx_I}{dt} = k_d (1 - x_I) \\ \rho \cdot V \cdot C_p \frac{dT}{dt} = \frac{U_{nagr}^2}{R_{sopr}} + M_{st} \cdot \Delta H \frac{dx_m}{dt} - q_{pot} \end{cases}$$

где x_m , x_I – степени конверсий мономера и инициатора; I_0 , I – начальная и текущая концентрации инициатора; M_{inic} – молярная масса инициатора; k_{eff} – эффективная константа скорости реакции; $F(x_m)$ – функция, учитывающая поправку к константе скорости обрыва цепи k_t на гелевый эффект; ε – коэффициент изменения объема в ходе реакции полимеризации; T – температура процесса, К; V – объём реакционной смеси, м³; ρ – плотность реакционной смеси, кг/м³; C_p – теплоёмкость реакционной смеси, Дж/(кг·К); M_{st} – масса стирола, кг; R_{sopr} – сопротивление нагревательного элемента, Ом; U_{nagr} – напряжение на нагревательном элементе реактора, В; ΔH – энтальпия процесса, Дж/кг; q_{pot} – тепловой поток потерь тепла в окружающую среду, определялся экспериментально, Вт.

Процесс СПС исследовался в условиях автоматически поддерживаемых постоянными температуры в реакционной смеси и скорости вращения мешалки.

С помощью математической модели процесса СПС при температурах 80, 85, 90 и 95°C, были получены кривые степеней конверсий мономера от времени (рис. 3), имеющие явно нелинейный вид.

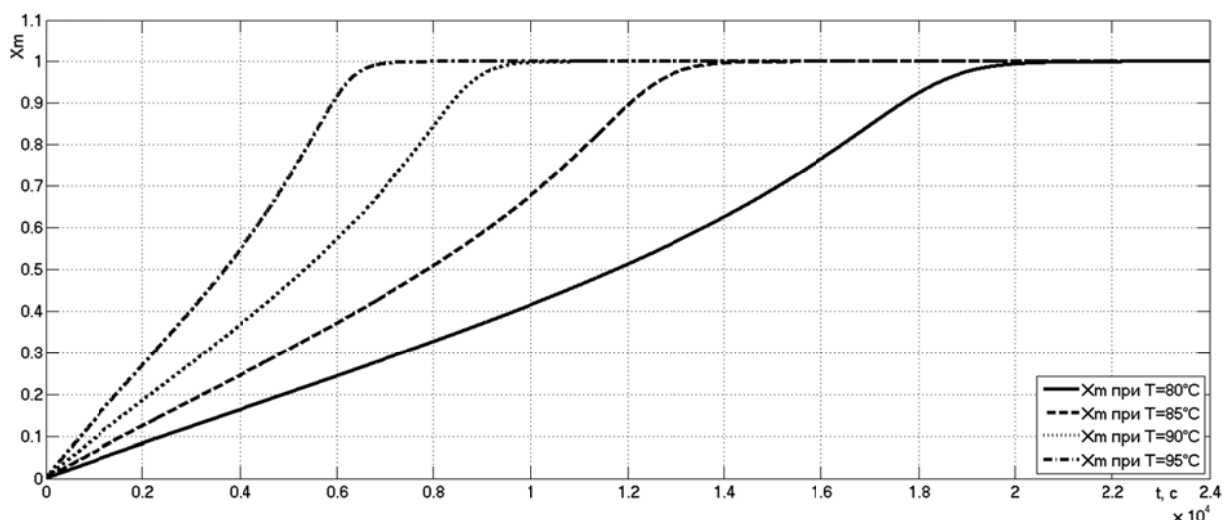


Рис. 3. Зависимости степеней конверсий мономера x_m от времени t

Критерием адекватности полученной математической модели может служить сравнение величин мощности для поддержания температурного режима внутри реактора, полученной в результате проведения экспериментов $q_{nagroput}$ с данными, полученными при моделировании процесса СПС $q_{nagrmodel}$. Результаты сравнения показаны на рис. 4 при температуре процесса 90°C .

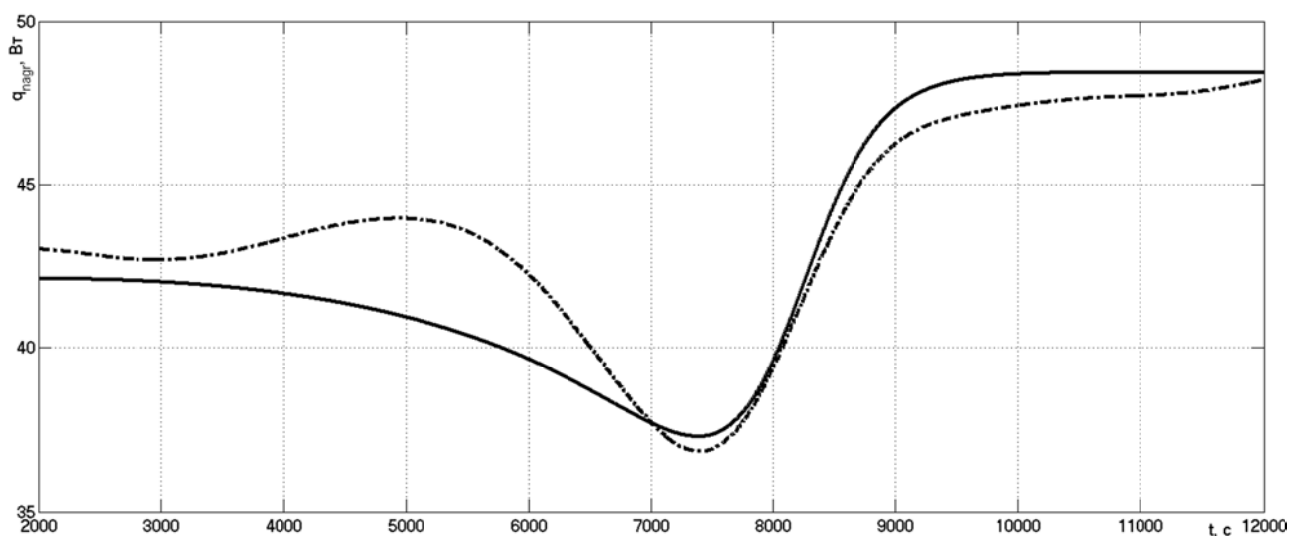


Рис. 4. Зависимости мощностей $q_{nagrmodel}$ (—) и $q_{nagroput}$ (- · -) от времени t

Из рис. 4 видно, что наблюдается хорошая согласованность экспериментальных данных $q_{nagroput}$ с данными рассчитанными по модели $q_{nagrmodel}$. Рассчитанная относительная ошибка моделирования составляет не более 5%, поэтому полученную математическую модель можно считать адекватной. Она может быть использована для моделирования различных

рецептур загрузки реактора, выбора оптимальных температурных режимов протекания процесса, а также для синтеза систем управления процессом СПС.

Четвертая глава посвящена программной реализации автоматической системы управления реактором полимеризации стирола.

Система управления процессом СПС заключается в регулировании температурного режима в зоне реакции, с помощью изменения подачи теплоносителя и/или хладагента поступающего к реактору, отличающийся тем что, используется дополнительное воздействие на температуру смеси путем изменения гидродинамического режима внутри реактора за счет изменения заданной скорости вращения мешалки реактора, которая корректируется в зависимости от рассчитанных по математической модели процесса свойств реакционной среды. Данная система управления процессом полимеризации изображена в виде блок схемы на рис. 5.

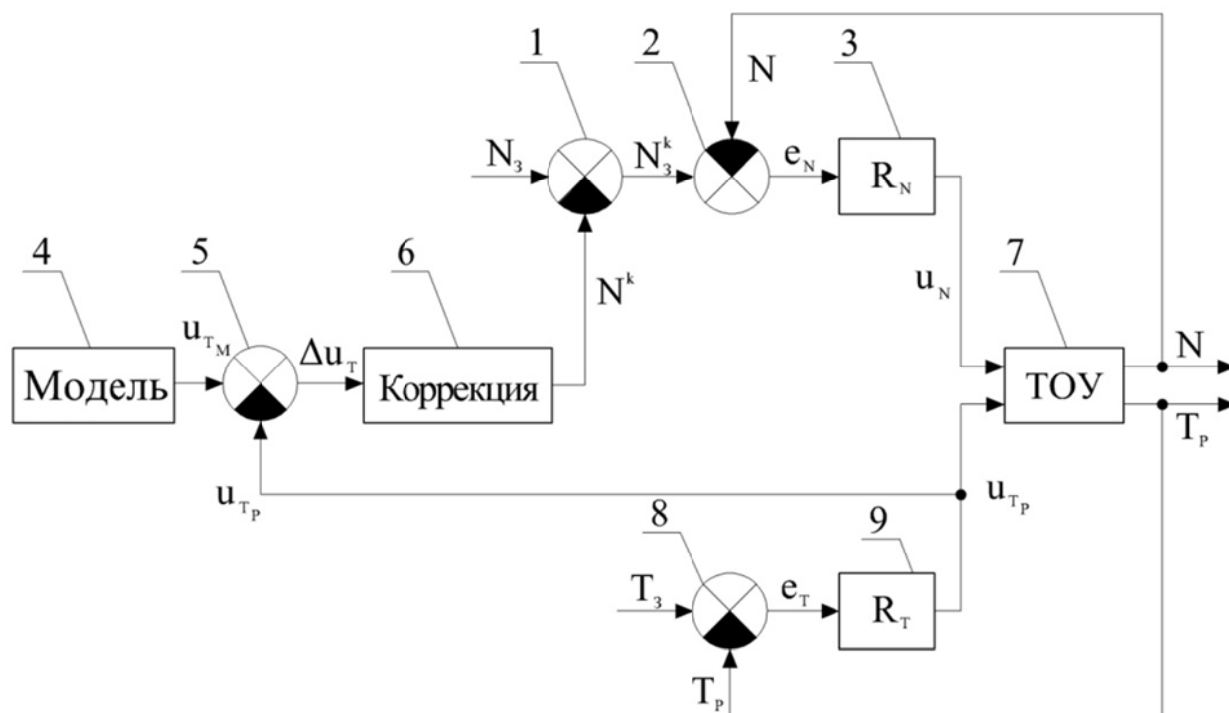


Рис. 5. Блок схема автоматического управления процессом СПС

Система состоит из двух контуров управления. Первый контур обеспечивает стабилизацию температуры реакционной смеси внутри реактора T_p с помощью регулятора 9 (R_T). Второй контур обеспечивает стабилизацию скорости вращения мешалки N с помощью регулятора 3 (R_N).

В первом контуре системы автоматического управления, заданная температура в реакторе T_3 сравнивается с текущим значением температуры T_p в сумматоре 8. Ошибка рассогласования $e_T = (T_3 - T_p)$ поступает на вход регулятора

9, стабилизирующего температуру реакционной смеси внутри реактора T_p . Регулятор 9 вырабатывает управляющее воздействие u_{Tp} , которое подается на ТОУ 7 (реактор-полимеризатор) в виде значения мощности необходимой для поддержания заданной температуры внутри реактора T_z . Текущее значение температуры внутри реактора T_p из ТОУ в виде обратной связи поступает в сумматор 8, тем самым замыкая первый контур управления.

Во втором контуре системы автоматического управления задание скорости вращения мешалки реактора N_z^k (при корректирующем сигнале $N^k=0$, равно N_z – первоначальному заданию скорости вращения мешалки, т.е. $N_z^k=N_z$) сравнивается с текущим значением N в сумматоре 2. Ошибка рассогласования $e_N=(N_z^k-N)$ поступает на вход регулятора 3, стабилизирующего скорость вращения мешалки реактора N . Регулятор 3 вырабатывает управляющее воздействие u_N , которое подается на технологический объект управления (ТОУ) 7 в виде значения мощности необходимой для вращения мешалки реактора. Текущее значение скорости вращения мешалки N в виде обратной связи поступает в сумматор 2, тем самым замыкая второй контур управления.

На рис. 5 показано также, что контур управления скоростью вращения мешалки реактора имеет коррекцию заданной скорости вращения N_z^k в зависимости от нескольких величин. Первая величина – это управляющее воздействие регулятора температуры u_{Tp} , значение которой поступает в виде сигнала с реального ТОУ во время ведения процесса. Вторая величина u_{Tm} , аналогична первой, но её значение рассчитывается по математической модели на основании общих кинетических, тепловых и гидродинамических зависимостей процесса СПС. Обе величины поступают на сумматор 5, где они сравниваются. Их разница Δu_T поступает в блок коррекции 6, который вырабатывает корректирующее воздействие N^k , которое поступает на сумматор 1, где оказывает воздействие на величину первоначального задания скорости вращения мешалки N_z , в виде коррекции.

Это коррекция оказывается в момент, когда изменяется вязкость среды. В период увеличения вязкости наблюдается уменьшение значения подаваемой мощности для поддержания температуры u_{Tp} , вследствие увеличения диссипации механической энергии перемешивания. В этом случае корректирующий параметр N^k воздействует на задание скорости вращения в сторону уменьшения. В период уменьшения вязкости наблюдается увеличение значения подаваемой мощности для поддержания температуры u_{Tp} , вследствие уменьшения диссипации механической энергии перемешивания. В этот период процесса, корректирующий параметр N^k воздействует на задание скорости вращения в сторону увеличения.

Пример результатов работы системы автоматического управления реактором синтеза СПС представлен на рис. 6.

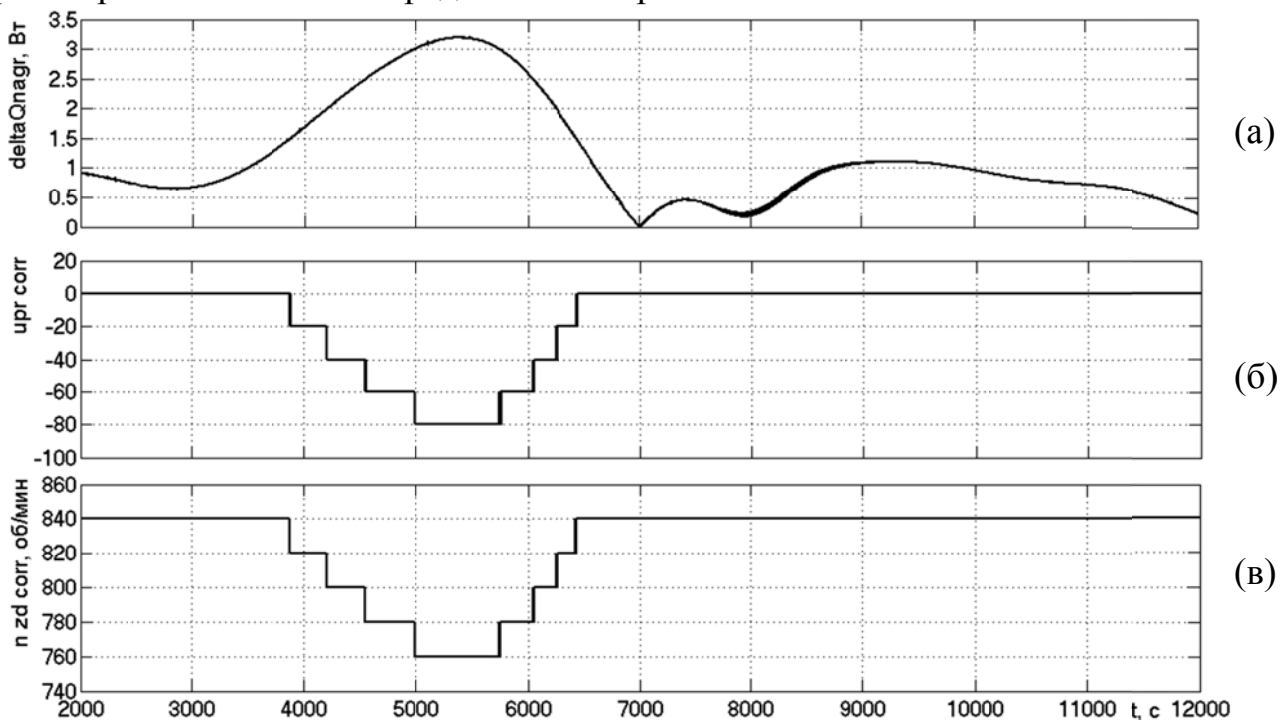


Рис. 6. Разница между теоретической и опытной мощностями (а), управляющий корректирующий сигнал (б) и скорректированное задание скорости вращения мешалки реактора (в)

Программа управления позволяет корректировать скорость вращения мешалки реактора на основе разницы между величинами, представленными на рис. 4. На основании этой разницы ΔQ_{nagr} (рис. 6), взятой по модулю, был выработан управляющий сигнал $upr\ corr$, который корректирует заданную скорость вращения мешалки $n\ zd\ corr$ по разработанному алгоритму автоматического управления процессом СПС.

Из рис. 6 видно, что коррекция производится сначала в меньшую сторону, затем в большую, в зависимости от величины ΔQ_{nagr} . Количество условий, позволяющих корректировать скорость, зависит от конкретного исследуемого объекта.

Отличительной особенностью данного способа управления является отслеживание значений параметров процесса, с помощью модели, и на их основании выработка корректирующего воздействия, на параметры автоматической системы управления, что позволяет улучшить качество управления технологическим объектом и как следствие качество получаемого продукта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1) Разработана система автоматического управления реактором синтеза суспензионного полистирола с учетом кинетики процесса, позволяющая осуществлять корректировку скорости вращения мешалки (при изменении вязкости реакционной смеси), в зависимости от величин, просчитанных с помощью математической модели.

2) Разработана физическая модель, на которой, произведено детальное исследование процесса СПС и получены следующие результаты:

– выявлен эффект увеличения мощности, требуемой для перемешивания реакционной среды в период «липкой» стадии процесса и уменьшение мощности на поддержание температуры реакционной смеси в этот же период;

– обнаружена стадия перехода полимера из вязко-текучего состояния в стеклообразное (стеклование полимера);

– установлена природа неустойчивости процесса: конкуренция процессов слипания ПМЧ и их «затвердевания», первый из которых контролируется степенью турбулизации реакционной смеси, а второй – кинетикой реакции полимеризации.

3) На основании проведенных экспериментальных исследований разработана адекватная математическая модель реактора СПС, включающая описание кинетики процесса, за основу которой взято два дифференциальных уравнения, описывающих степени конверсий, мономера и инициатора, а также дифференциальное уравнение теплового баланса реактора-полимеризатора. Проведена проверка адекватности полученной математической модели с помощью сравнения теоретических данных с реальными результатами, полученными на физической модели при различных рецептурах загрузки и температурных режимах. Рассчитанная относительная ошибка моделирования составляет не более 5 %.

4) На основании полученного математического описания реактора синтеза СПС разработана программа управления процессом полимеризации, использующая коррекцию одной из управляемых величин – скорости вращения мешалки, с учетом изменения вязкости реакционной смеси, определяемой кинетикой процесса.

5) Синтезированная система автоматического управления была апробирована на физической модели. Результаты работы показали работоспособность данной системы управления.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях перечня ВАК

1. Сафин М. А., Лопатин А. Г., Вент Д. П., Савельянов В. П. Сравнение кинетических моделей процесса суспензионной полимеризации стирола // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 3. С. 321-325.
2. Вент Д. П., Савельянов В. П., Лопатин А. Г., Сафин М. А. Влияние перемешивания на динамику реактора полимеризации стирола // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2012. № 2. С. 212-218.
3. Сафин М. А., Лопатин А. Г., Вент Д. П., Савельянов В. П. Математическая модель пилотной установки процесса суспензионной полимеризации стирола // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 2. С. 267-276.
4. Вент Д. П., Савельянов В. П., Лопатин А. Г., Сафин М. А. Прикладная кинетика суспензионной полимеризации стирола // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48. №3 С. 245-251.

Патенты и электронные свидетельства

5. Сафин М.А., Вент Д. П., Лопатин А. Г., Савельянов В. П. / Способ автоматического управления реактором синтеза суспензионной полимеризации стирола: пат. 024613 Рос. Федерация № 2012116320/08; заявл. 31.05.12; опубл. 27.10.13, Бюл. № 30. 3 с.
6. Сафин М.А., Лопатин А.Г., Савельянов В.П., Вент Д.П. / Программная реализация системы управления лабораторным реактором: № ОФЭРНиО: 18150 [Электронный ресурс] // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», № 4: [сайт]. [2012]. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2012/4.doc>.

В других изданиях

7. Вент Д. П., Сафин М. А., Лопатин А. Г., Савельянов В. П. Пилотная установка для изучения сложных реакционных систем // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика. Экология, Экономика. 2011. Т. 13. Ч. I. С. 114-115.

8. Вент Д.П., Сафин М.А., Лопатин А.Г., Савельянов В.П. Особенности автоматического управления пилотной установкой для изучения статических и динамических характеристик сложных химических процессов // Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: Кибернетика, Автоматизация, Математика, Информатизация: РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт. Новомосковск: Изд-во НИ (ф) РХТУ, 2011. С. 213-215.

9. Вент Д.П., Сафин М.А., Лопатин А.Г., Савельянов В.П. О роли физических состояний полимера в процессе суспензионной полимеризации стирола // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXIV междунаод. науч. конф. Пенза: изд-во ПГТА, 2011. Т. 7.

10. Вент Д.П., Сафин М.А., Лопатин А.Г., Савельянов В.П. О динамике суспензионной полимеризации стирола / Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXIV междунаод. науч. конф. Пенза: изд-во ПГТА, 2011. Т. 7.

11. Вент Д. П., Савельянов В. П., Лопатин А. Г., Сафин М. А. Влияние скорости вращения мешалки на динамику реактора суспензионной полимеризации стирола // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, Экология, Экономика. 2012. Т. 14 Ч. I. С. 91-94.

12. Вент Д. П., Лопатин А. Г., Савельянов В. П., Сафин М. А. Использование кинетической модели процесса суспензионной полимеризации стирола // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, Экология, Экономика. 2012. Т. 14 Ч. I. С. 213-217.

13. Вент Д.П., Сафин М.А., Лопатин А.Г., Савельянов В.П. О связи динамических и кинетических переменных в синтезе суспензионного полистирола // Труды НИ РХТУ им. Д. И. Менделеева. Серия: Кибернетика, Автоматизация, Математика, Информатизация: РХТУ им. Д. И. Менделеева, Новомосковский институт. Новомосковск. 2013. С. 4-5.