

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.021:004.942

АКИНШЕВА
Ирина Владиславовна

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕАКТОРАМИ
ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Минск 2017

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель **Кузьмицкий Иосиф Фелицианович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Кулаков Геннадий Тихонович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета
Хаджинов Михаил Касьянович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем управления учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Защита состоится 23 марта 2017 г. в 14.00 ч. на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «__» февраля 2017 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук,
доцент

М. П. Ревотюк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автоматическое управление как процессами, так и отдельными аппаратами применяется в различных отраслях промышленности, в том числе и химической. Это продиктовано все более повышающимися требованиями к качеству выпускаемой продукции для обеспечения ее конкурентоспособности, а также экономией потребления различного вида энергетических ресурсов на предприятиях. Чтобы осуществить на практике управление процессами, разрабатываются и внедряются в производство системы управления.

В процессах химической промышленности необходимо внедрение и использование систем управления, так как химические реакторы должны работать при условиях, которые на выходе дают продукты, удовлетворяющие относительно узким требованиям спецификаций, а свойства компонентов продуктов являются критическими. Одним из таких процессов является процесс производства полиэтилентерефталата (ПЭТФ), который описывается нелинейной математической моделью. Он разделен на две основные стадии: переэтерификации и поликонденсации. Поликонденсация протекает в реакторах предварительной (ППК) и основной (ОПК) поликонденсации и является заключительным этапом в производстве ПЭТФ. Поэтому важной производственной задачей является поддержание оптимальных значений параметров процесса и контроль качества ПЭТФ на стадии поликонденсации. Ввиду увеличения спроса на продукцию необходимо увеличивать производительность установки, проводить перенастройку оптимальных значений параметров процесса, что приводит к увеличению затрат как на трудовые, так и на энергетические ресурсы.

Таким образом, актуальным является построение системы управления реакторами поликонденсации с целью снижения затрат на энергетические ресурсы и повышения качества ПЭТФ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Государственной комплексной программой научных исследований «Механика» (задание 3.2.31), включенной в План важнейших научно-исследовательских работ в области естественных, технических, гуманитарных и социальных наук Республики Беларусь на 2006–2010 гг., утвержденный постановлением президиума НАН Беларуси № 20 от 24.02.2006 г., в рамках которой автором проводились исследования на кафедре автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» по госбюджетной научно-исследовательской работе ГБ № 26-141

«Разработка методов анализа, синтеза, алгоритмов программного обеспечения и создание высокоэффективных систем автоматизации на основе современных информационных технологий и программно-аппаратных комплексов» (2006–2010 гг., № ГР20066831), а также на кафедре автоматизации технологических процессов и производств учреждения образования «Могилевский государственный университет продовольствия» в рамках этапов ХД № 2007-01 МГУП «Разработка оптимизированной математической модели синтеза полиэтилентерефталата в химическом цехе Завода органического синтеза на ОАО «Могилевхимволокно»» (2006–2008 гг., № ГР20073569); госбюджетной научно-исследовательской работы ГБ № 31-16 «Разработка и исследование математических моделей ресурсосбережения в системах автоматизации пищевой и химической промышленности» (2010–2014 гг., № ГР20112369); этапов научно-исследовательской работы № Ф12МВ-049 «Построение автоматизированной адаптивной системы оптимального управления процессом поликонденсации в производстве полиэтилентерефталата», выполняемой по заказу Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований совместно с Министерством образования Республики Беларусь (2012–2014 гг., № ГР20123100).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является сокращение затрат на энергоресурсы и повышение качества полиэтилентерефталата за счет построения автоматизированной адаптивной системы управления реакторами поликонденсации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель процесса поликонденсации, отражающую динамические свойства исследуемого объекта.
2. Разработать алгоритм поиска оптимальных значений управляющих переменных процесса поликонденсации.
3. Разработать процедуру определения области устойчивости аппроксимированных функциональными рядами динамических характеристик.
4. Разработать алгоритм, реализующий оптимальную адаптивную систему управления реакторами поликонденсации.
5. Провести оценку качественных характеристик полученного полиэтилентерефталата.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель процесса поликонденсации, включающая кинетику реакций и идентификацию динамических характеристик, аппроксимированных рядами Вольтерра второго порядка с использованием процедуры регуляризации для уменьшения ошибки аппроксимации.

2. Разработан алгоритм поиска оптимальных значений управляющих переменных процесса поликонденсации, позволяющий сформировать законы управления для вычисления оптимальных значений переменных с целью получения энергосберегающего эффекта при управлении реакторами поликонденсации.

3. Разработана процедура, реализующая новый подход к определению области асимптотической устойчивости динамических характеристик процесса поликонденсации, путем использования в расчетах коэффициентов аппроксимации, полученных при применении процедуры регуляризации.

4. Разработан и внедрен в промышленность алгоритм, реализующий оптимальную адаптивную систему управления реакторами поликонденсации, позволяющий улучшить качество получаемого полимера и сократить затраты на энергоресурсы.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель процесса поликонденсации, отличающаяся от известных описанием кинетики и идентификации динамических характеристик, аппроксимация которых осуществляется рядами Вольтерра второго порядка с использованием процедуры регуляризации, позволяющая исследовать нелинейные свойства процесса.

2. Законы управления, с помощью которых осуществляется расчет оптимальных значений управляющих переменных для получения энергосберегающего эффекта при управлении реакторами поликонденсации.

3. Новый подход к определению области асимптотической устойчивости динамических характеристик модели процесса поликонденсации, отличающийся от известных использованием при расчетах только коэффициентов аппроксимации, полученных в результате регуляризации.

4. Реализация и внедрение в промышленность оптимальной адаптивной энергосберегающей системы управления реакторами поликонденсации в производстве полиэтилентерефталата, позволяющей улучшить качество получаемого полимера.

Личный вклад соискателя ученой степени заключается в разработке методики проведения активного эксперимента на ОАО «Могилевхимволокно», обработке полученных экспериментальных данных, разработке математической модели процесса, составлении оптимального критерия качества системы и вычислении концентрации карбоксильных групп в ПЭТФ, создании программного обеспечения для реализации системы управления реакторами поликонденсации, в формулировке теоретических выводов о проведенных исследованиях на ЗАО СП «Сопотекс», подтверждающих повышение качества продукта. В пуб-

ликациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: VI-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2007); 72-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2008); 73-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2009); VII-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2009); Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, 2009); 74-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2010); VII-я Международная научная конференция студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2010); V-я научно-практическая конференция с международным участием «Математическое и имитационное моделирование систем МОДС'2010» (Чернигов, 2010); 75-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2011); VIII-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2011); Международная научно-техническая конференция «Системный анализ и информационные технологии SAIT 2011» (Киев, 2011); Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» (БГУИР, Минск, 2011); Международная научно-практическая конференция-семинар «Перспективы технологии и оборудование для производства и переработки волокнистых и пленочных материалов «Волокна и пленки»» (Могилев, 2011); 76-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2012); International scientific conference «Management 2012» (Белград, 2012); VIII-я Международная научная конференция студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2012); 48-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные технологии и управление» (БГУИР, Минск, 2012); 77-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2013); IX-я Международная научно-техническая конференция

«Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2013); 78-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2014); IX-я Международная научная конференция студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2014).

Опубликование результатов диссертации

По тематике и результатам представленной диссертационной работы опубликовано 26 печатных работ, из них 10 статей в республиканских и международных научных журналах, материалы 3 докладов на научно-технических и научно-практических конференциях, тезисы 12 докладов на научно-технических конференциях. Результаты работы включены в 4 отчета о НИР.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 4,375 авторских листа.

Структура и объем диссертации

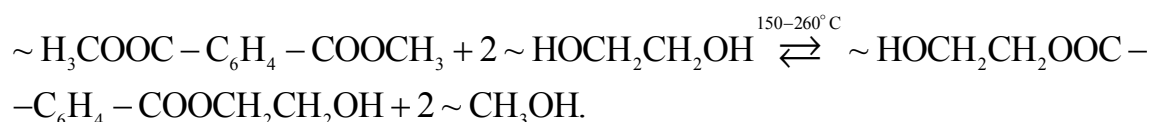
Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и десяти приложений. Общий объем диссертации составляет 170 страниц, из них 81 страница основного текста. Работа содержит 68 рисунков на 28 страницах, 10 таблиц на 3 страницах, библиографический список из 162 источников на 12 страницах и 26 публикаций автора на 3 страницах, 10 приложений на 43 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** рассмотрена актуальность выбранного направления исследований ввиду широкого спектра использования ПЭТФ и возрастающих требований экономии затрат предприятий на энергетические ресурсы.

В **общей характеристике работы** сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, представлены основные положения, выносимые на защиту, показан уровень опубликования и апробирования результатов диссертации.

В **первой главе** подробно описан процесс производства ПЭТФ. Выделена стадия поликонденсации как наиболее существенная в процессе получения полимера. Представлены реакции, протекающие в аппаратах процесса, в том числе и реакция поликонденсации:



Наряду с другими сопутствующими реакциями, реакция поликонденсации протекает в реакторах ППК и ОПК.

Произведен обзор систем управления поликонденсационными процессами, на основании которого выявлено, что существующая система управления не обеспечивает энергосберегающего режима ведения технологического процесса, что требует системного анализа и разработки новой системы управления. Реакторы поликонденсации рассматривались в виде системы, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

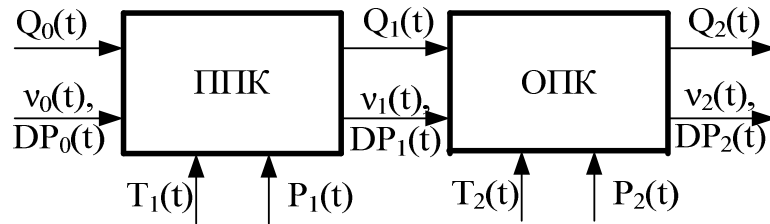


Рисунок 1. – Схема распределения переменных процесса поликонденсации

Входными переменными реактора ППК являются: количество поступающего дигликольтерефталата (ДГТ) $Q_0(t)$, степень полимеризации расплава $DP_0(t)$, вязкость поступающего ДГТ $v_0(t)$; выходными переменными – количество полученного полимера $Q_1(t)$, вязкость полученного полимера $v_1(t)$, степень полимеризации ПЭТФ $DP_1(t)$; управляющими переменными – температура $T_1(t)$ и давление $P_1(t)$ в реакторе ППК.

Входными переменными реактора ОПК являются выходные переменные реактора ППК; выходными переменными – степень полимеризации ПЭТФ $DP_2(t)$, количество полученного ПЭТФ $Q_2(t)$, вязкость ПЭТФ $v_2(t)$; управляющими переменными – температура $T_2(t)$ и давление $P_2(t)$ в реакторе ОПК.

Наряду с вязкостью качественной характеристикой полимера является степень полимеризации $DP(t)$. Данная переменная зависит от концентрации продуктов реакций, образующихся в реакторах ППК и ОПК. Поэтому, при разработке новых способов автоматического измерения состава полимера, для определения концентрации образующихся побочных групп, использовалась зависимость вязкости от степени полимеризации ПЭТФ.

Учитывая описанные зависимости, можно сделать вывод, что процесс поликонденсации является многосвязным объектом, имеющим сложную по своей аналитической форме математическую модель. Анализ кинетических зависимостей показал, что они не отражают в полном объеме динамику протекающих процессов, поэтому существует необходимость в идентификации динамических характеристик процесса поликонденсации.

Во **второй главе** описано моделирование процессов, происходящих внутри реакторов поликонденсации, приведен механизм определения концен-

траций веществ, полученных в ходе реакций, протекающих в реакторах совместно с реакцией поликонденсации. По концентрациям веществ в расплаве полимера можно определить степень полимеризации $DP(t)$ ПЭТФ, которая, согласно кинетике поликонденсации, представлена в виде:

$$DP(t) = \left(\frac{(C_{Eg}(t) + C_{Ea}(t) + C_{Ev}(t) + C_{E_{DEG}}(t) + 2C_Z(t))_{\text{выход}}}{(C_{Eg}(t) + C_{Ea}(t) + C_{Ev}(t) + C_{E_{DEG}}(t))_{\text{вход}}} \right), \quad (1)$$

где t – время пребывания ПЭТФ в реакторах поликонденсации;

$C_{Eg}(t)$, $C_{Ea}(t)$, $C_{Ev}(t)$, $C_Z(t)$ – концентрации гидроксильных, карбоксилных, винильных, диэфирных концевых групп, соответственно;

$C_{E_{DEG}}(t)$ – концентрация диэтиленгликолевых концевых групп.

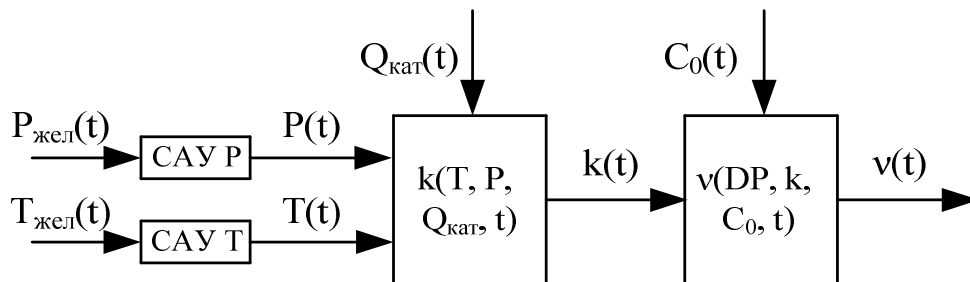
Для вычисления $DP(t)$, согласно (1), необходимо измерить концентрации веществ в расплаве, что является сложной задачей. Непосредственно в ходе технологического процесса измеряется вязкость полимера, на которую влияет степень полимеризации ПЭТФ. Установлена следующая взаимосвязь:

$$v(t) = \alpha_0 DP(t), \quad (2)$$

где α_0 – коэффициент соотношения степени полимеризации и вязкости ПЭТФ.

Структурная схема определения вязкости полимера представлена на рисунке 2.

В последнем блоке схемы константы скорости реакций k_i и начальные значения концентраций продуктов реакций $C_0(t)$, входящие в уравнения кинетики поликонденсации, используются в выражении для определения степени полимеризации.



$P(t)$ – давление в реакторах поликонденсации; $T(t)$ – температура в реакторах поликонденсации; $P_{\text{жел}}(t)$ – заданные значения давления в реакторах поликонденсации; $T_{\text{жел}}(t)$ – заданные значения температуры в реакторах поликонденсации; САУ Р, САУ Т – составляющие автоматизированной системы, содержащие программы управления температурой и давлением в реакторах поликонденсации; $Q_{\text{кат}}(t)$ – расход катализатора в процессе; $k(T, P, Q_{\text{кат}}, t)$ – константы скорости реакций; $C_0(t)$ – начальные концентрации продуктов реакций; $v(DP, k, C_0, t)$ – вязкость ПЭТФ

Рисунок 2. – Структурная схема определения вязкости ПЭТФ

Для определения коэффициента соотношения α_0 необходимо иметь функциональную зависимость не только для степени полимеризации (1), но и вязкости. Для определения функциональной зависимости вязкости от управляющих

переменных процесса разработана методика проведения активного эксперимента для снятия динамических характеристик. Так как влияние на вязкость полимера оказывают температура и давление внутри реакторов, то при идентификации были учтены следующие взаимосвязи: изменение температуры происходит за счет изменения расхода теплоносителя в рубашках аппаратов; изменение давления происходит за счет изменения расхода азота, требуемого для конденсации паров этиленгликоля, отгоняемого из реакторов.

После снятия динамических характеристик возникает задача идентификации, решение которой заключается в предварительной аппроксимации весовыми функциями $h_i(t)$ объекта, согласно теории Вольтерра, и последующем определении коэффициентов и показателей степеней по результатам наблюдений за входными и выходными сигналами:

$$h_i(t) = \int_0^t A_i \varphi_i(t) dt, \quad (3)$$

где $\varphi_i(t)$ – некоторая функция, отражающая динамические свойства объекта и абсолютно интегрируемая на исследуемом интервале времени;

A_i – коэффициенты аппроксимации.

Функции $\varphi_i(t)$ представлены в виде весовых функций аperiodического звена второго порядка. В данном случае модель объекта, аппроксимированная рядами Вольтерра второго порядка с использованием весовых функций, имеет следующий вид:

$$v_1(t) = v_0(t) + A_1 \int_0^t (e^{-p_1 \tau_1} - e^{-p_2 \tau_1}) T_1(t - \tau_1) d\tau_1 + A_2 \int_0^t (e^{-p_3 \tau_2} - e^{-p_4 \tau_2}) \times \\ \times P_1(t - \tau_2) d\tau_2 + A_3 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_5 \tau_1} - e^{-p_6 \tau_1}) (e^{-p_7 \tau_2} - e^{-p_8 \tau_2}) T_1(t - \tau_1) P_1(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad (4)$$

$$Q_1(t) = Q_0(t) + A_4 \int_0^t (e^{-p_9 \tau_1} - e^{-p_{10} \tau_1}) T_1(t - \tau_1) d\tau_1 + A_5 \int_0^t (e^{-p_{11} \tau_2} - e^{-p_{12} \tau_2}) P_1(t - \tau_2) d\tau_2 + \\ + A_6 \int_0^t (e^{-p_{13} \tau_3} - e^{-p_{14} \tau_3}) v_1(t - \tau_3) d\tau_3 + A_7 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_{15} \tau_1} - e^{-p_{16} \tau_1}) T_1(t - \tau_1) (e^{-p_{17} \tau_2} - e^{-p_{18} \tau_2}) \times \\ \times P_1(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + A_8 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_{19} \tau_1} - e^{-p_{20} \tau_1}) T_1(t - \tau_1) (e^{-p_{21} \tau_3} - e^{-p_{22} \tau_3}) v_1(t - \tau_3) d\tau_1 d\tau_3 + \\ + A_9 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_{23} \tau_2} - e^{-p_{24} \tau_2}) P_1(t - \tau_2) (e^{-p_{25} \tau_3} - e^{-p_{26} \tau_3}) v_1(t - \tau_3) d\tau_2 d\tau_3, \quad (5)$$

$$v_2(t) = v_1(t) + A_{10} \int_0^t (e^{-p_{27} \tau_4} - e^{-p_{28} \tau_4}) T_2(t - \tau_4) d\tau_4 + A_{11} \int_0^t (e^{-p_{29} \tau_5} - e^{-p_{30} \tau_5}) \times \\ \times P_2(t - \tau_5) d\tau_5 + A_{12} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_{31} \tau_4} - e^{-p_{32} \tau_4}) T_2(t - \tau_4) (e^{-p_{33} \tau_5} - e^{-p_{34} \tau_5}) P_2(t - \tau_5) d\tau_4 d\tau_5, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
Q_2(t) = & Q_1(t) + A_{13} \int_0^t (e^{-p_{35}\tau_4} - e^{-p_{36}\tau_4}) T_2(t-\tau_4) d\tau_4 + A_{14} \int_0^t (e^{-p_{37}\tau_5} - e^{-p_{38}\tau_5}) P_2(t-\tau_5) d\tau_5 + \\
& + A_{15} \int_0^t (e^{-p_{39}\tau_6} - e^{-p_{40}\tau_6}) v_2(t-\tau_6) d\tau_6 + A_{16} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_{41}\tau_4} - e^{-p_{42}\tau_4}) T_2(t-\tau_4) (e^{-p_{43}\tau_5} - e^{-p_{44}\tau_5}) \times \\
& \times P_2(t-\tau_5) d\tau_4 d\tau_5 + A_{17} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_{45}\tau_4} - e^{-p_{46}\tau_4}) T_2(t-\tau_4) (e^{-p_{47}\tau_6} - e^{-p_{48}\tau_6}) v_2(t-\tau_6) d\tau_4 d\tau_6 + \\
& + A_{18} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_{49}\tau_5} - e^{-p_{50}\tau_5}) P_2(t-\tau_5) (e^{-p_{51}\tau_6} - e^{-p_{52}\tau_6}) v_2(t-\tau_6) d\tau_5 d\tau_6, \quad (7)
\end{aligned}$$

где $v_0(t)$ – вязкость ДГТ на входе в реактор ППК, Па·с;

$v_1(t)$ – вязкость ПЭТФ на выходе из реактора ППК, Па·с;

$v_2(t)$ – вязкость ПЭТФ на выходе из реактора ОПК, Па·с;

$Q_0(t)$ – расход ДГТ на входе в реактор ППК, Па·с;

$Q_1(t)$ – расход ПЭТФ на выходе из реактора ППК, Па·с;

$Q_2(t)$ – расход ПЭТФ на выходе из реактора ОПК, Па·с;

$T_1(t-\tau_k)$ – температура в реакторе ППК, °С;

$P_1(t-\tau_k)$ – давление в реакторе ППК, Па;

$T_2(t-\tau_k)$ – температура в реакторе ОПК, °С;

$P_2(t-\tau_k)$ – давление в реакторе ОПК, Па;

t – время пребывания ПЭТФ в реакторах поликонденсации, с;

p_n – показатели степени при экспонентах в аperiodических звеньях второго порядка, $n = \overline{1..52}$;

A_i – коэффициенты аппроксимации, $i = \overline{1..18}$;

τ_k – сдвиг по времени, с, $k = \overline{1..6}$.

При аппроксимации динамических характеристик выражениями (4)–(7), величина относительной дисперсии ошибки являлась недопустимой для производственного процесса. Поэтому в алгоритм идентификации включена процедура регуляризации параметров модели, в качестве которых приняты зависящие от времени коэффициенты $A_i(t)$. Для каждого коэффициента, составлена система, включающая корреляционные функции переменных процесса

$$R_{ym}(t) = A_i(t) \int_0^t R_{im}(t) dt, \quad t \in [0; T], \quad m = 1, \dots, N, \quad (8)$$

где $R_{ym}(t) = M\{v(t), Q(t), z^n(t)\}, \quad (9)$

$$R_{im}(t) = M\{z^n(t), z^{n+1}(t)\}, \quad (10)$$

$$z^n(t) = \int_0^t \varphi_n(t) T_i(t) dt, \quad (11)$$

$$z^n(t) = \int_0^t \varphi_n(t) P_i(t) dt, \quad (12)$$

где $M\{*\}$ – математическое ожидание выходных переменных процесса;

$z^n(t)$ – реакция динамического элемента, реализующего n -ю аппроксимирующую функцию на рабочий входной сигнал;

$\varphi_i(t)$ – функция, отражающая динамические свойства объекта;

$T_i(t)$, $P_i(t)$ – температура и давление в реакторах, соответственно.

Решая (8), получили систему линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов $A_i(t)$. При решении было учтено, что слагаемые рядов Вольтерра первого и второго порядка вычисляются независимо.

Принятые меры по регуляризации решения позволили достигнуть требуемой степени точности идентификации. Для оценки точности идентификации использовалась относительная дисперсия ошибки

$$\delta = \frac{\int_0^T (y_i(t) - y_i^m(t))^2 dt}{\int_0^T y_i(t)^2 dt}, \quad (13)$$

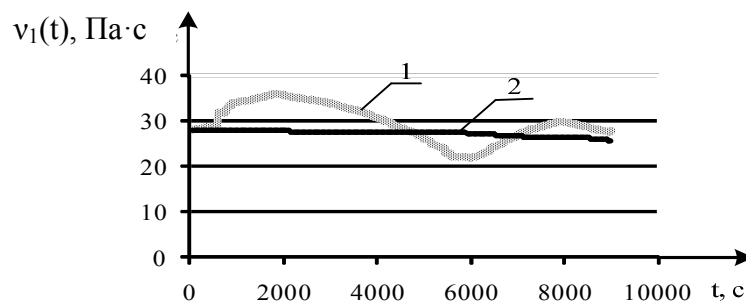
где T – время проведения эксперимента;

$y_i(t)$ – выходные переменные реакторов ППК и ОПК;

$y_i^m(t)$ – переменные, рассчитанные с помощью выражений (4)–(7).

Используя выражения (4)–(7), была проведена идентификация выходных переменных реакторов ППК и ОПК.

На рисунке 3 представлены графики изменения выходной переменной процесса поликонденсации при внесении в систему возмущений.



1 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный в результате проведения эксперимента; 2 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный на основе выражения аппроксимации (4) с применением процедуры регуляризации

Рисунок 3. – Графики изменения вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации

Таким образом, решена задача поиска функциональной зависимости вязкости полимера от управляющих переменных.

Так как известны значения вязкости ПЭТФ в каждой точке временного отрезка, равного времени пребывания расплава в реакторах ППК и ОПК, то, со-

гласно выражения (2), можно определить среднее значение коэффициента соотношения степени полимеризации и вязкости ПЭТФ – α_0 .

В **третьей главе** разработан алгоритм поиска оптимальных значений температуры и давления в реакторах ППК и ОПК.

Задача оптимального управления процессом поликонденсации, задаваемого уравнениями (4)–(7), сформулирована как задача минимизации обобщенного интегрального квадратичного критерия:

$$I = \int_0^T (\alpha(v_1^m(t) - v_1(t))^2 + \beta(v_2^m(t) - v_2(t))^2 + \chi(Q_1^m(t) - Q_1(t))^2 + \\ + \gamma(Q_2^m(t) - Q_2(t))^2 + \psi(DP^m(t) - DP(t))^2 + \eta(T_1^m(t) - T_1(t))^2 + \lambda(P_1^m(t) - \\ - P_1(t))^2 + \mu(T_2^m(t) - T_2(t))^2 + \pi(P_2^m(t) - P_2(t))^2 + \theta(\dot{T}_1^m(t) - \dot{T}_1(t))^2 + \\ + \rho(\dot{P}_1^m(t) - \dot{P}_1(t))^2 + \sigma(\dot{T}_2^m(t) - \dot{T}_2(t))^2 + \xi(\dot{P}_2^m(t) - \dot{P}_2(t))^2) dt, \quad (14)$$

где $\alpha, \beta, \chi, \gamma, \psi, \eta, \lambda, \mu, \pi, \theta, \rho, \sigma, \xi$ – весовые коэффициенты, определяющие компромисс между основными переменными процесса, а также дополнительными условиями по скорости изменения управляющих переменных;

T – время протекания процесса поликонденсации в реакторах ППК и ОПК.

$v_i^m(t), Q_i^m(t), DP_i^m(t), T_i^m(t), P_i^m(t), \dot{T}_i^m(t), \dot{P}_i^m(t)$ – мгновенные значения вязкости, расхода, степени полимеризации полимера, температуры, давления и их производных, соответственно, полученные в результате моделирования.

Для решения задачи оптимального управления были найдены весовые коэффициенты критерия оптимизации.

При нахождении оптимальных значений управляющих переменных использовалась теория вариационного исчисления, согласно которой подынтегральное выражение критерия (14) обозначили через $F(t)$. Функция, которая минимизирует функционал в (14), должна удовлетворять дифференциальному уравнению второго порядка Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial F(t)}{\partial T_i(t)} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F(t)}{\partial \dot{T}_i(t)} \right) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial F(t)}{\partial P_i(t)} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F(t)}{\partial \dot{P}_i(t)} \right) = 0. \quad (15)$$

Используя выражения (14) и (15), составили систему уравнений для определения минимизирующих функций. Решение системы сводится к решению системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, что является особенностью задач вариационного исчисления. Для численного решения данной системы использовался метод простой итерации. При использовании указанного метода был принят ряд допущений, не влияющих на точность вычислений. На основе вышеизложенного разработан алгоритм поиска оптимальных значений управляющих переменных, проведена оценка адекватности решения.

Так как выражения (4)–(7) характеризуют динамику процесса поликон-

денсации, то введя вспомогательные слагаемые, стало возможным учесть не только наличие ошибок, но и тенденцию к их изменению, увеличивая скорость реакции системы управления, и, тем самым повышая быстродействие системы. Ввиду нелинейности объекта, закон управления будет представлять нелинейную зависимость управляющих переменных от значений выходных переменных. С учетом, что управляющие переменные зависят от ошибок управления по всем выходным переменным, на которые оказывают воздействие, законы управления примут следующий вид:

$$T_1(t) = T_{01} + k_1(\Delta v_1(t))^2 + k_2(\Delta Q_1(t))^2 + k_3 \frac{d\Delta v_1(t)}{dt} + k_4 \frac{d\Delta Q_1(t)}{dt}, \quad (16)$$

$$P_1(t) = P_{01} + k_5(\Delta v_1(t))^2 + k_6(\Delta Q_1(t))^2 + k_7 \frac{d\Delta v_1(t)}{dt} + k_8 \frac{d\Delta Q_1(t)}{dt}, \quad (17)$$

$$T_2(t) = T_1(t) + k_9(\Delta v_2(t))^2 + k_{10}(\Delta Q_2(t))^2 + k_{11} \frac{d\Delta v_2(t)}{dt} + k_{12} \frac{d\Delta Q_2(t)}{dt}, \quad (18)$$

$$P_2(t) = P_1(t) + k_{13}(\Delta v_2(t))^2 + k_{14}(\Delta Q_2(t))^2 + k_{15} \frac{d\Delta v_2(t)}{dt} + k_{16} \frac{d\Delta Q_2(t)}{dt}, \quad (19)$$

где Δ – ошибка управления по переменной, рядом с которой указаный символ определен;

T_{01} и P_{01} – начальные значения температуры и давления в реакторе ППК, соответственно;

t – время пребывания ПЭТФ в реакторах поликонденсации;

k_1 – k_{16} – коэффициенты соотношения переменной структуры.

Для выражений (16)–(19) в работе применен итерационный метод. При использовании данного метода найдены значения коэффициентов k_1 – k_{16} , для которых заранее выбраны области поиска. Причем для увеличения точности аппроксимации коэффициенты k_1 – k_{16} имеют изменяющуюся во времени структуру: $k_i = C_{1i}t + C_{2i}t^2$. Условием сходимости будет стремление к минимальному значению квадрата разности между значениями управляющих переменных.

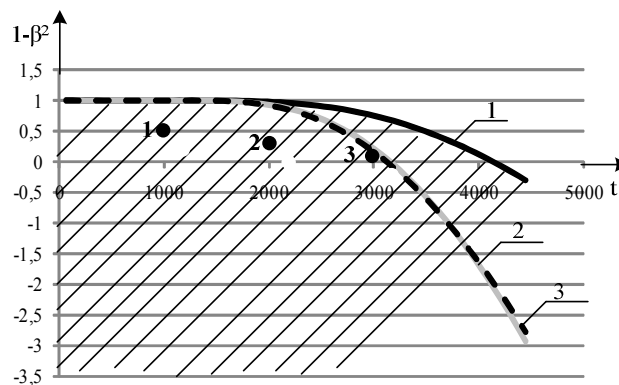
Относительная дисперсия ошибки, выраженная в процентах, для управляющих переменных, вычисленных в результате решения задачи оптимизации и определенных в соответствии с выражениями (16)–(19), имеет следующие значения: для температуры в реакторе ППК – 3,4 %; для давления в реакторе ППК – 4,0 %; для температуры в реакторе ОПК – 2,6 %; для давления в реакторе ОПК – 3,8 %.

Определены границы области устойчивости полученных выражений для выходных переменных рассматриваемого объекта. Исследование объекта на устойчивость в указанной области проводилось на основе теории устойчивости А.М. Ляпунова. Разработана процедура, использование которой приводит к определению границ устойчивости. В основе представленной ниже процедуры

для уравнений Вольтерра лежит использование функций Ляпунова для вспомогательных разностных уравнений, зависящих от конечного, заранее фиксированного числа шагов:

$$1 - \beta_0^2 > 2 \left| \beta_0 - 1 \left| \sum_{\ell=1}^{\infty} \left| \sum_{t=\ell}^{\infty} A_1(t) \right| \right| \right|, \text{ где } \beta_0 = \sum_{t=0}^{\infty} A_1(t). \quad (20)$$

При использовании левой части неравенства (20) была построена область асимптотической устойчивости для выражения (4). На рисунке 4 видно, что выбор границы устойчивости определяется по кривой $1 - \beta^2$, образующей с осью ординат наибольшую площадь. Из неравенства (20) видно, что значения в правой части всегда положительные, поэтому область с отрицательными значениями $1 - \beta^2$, которая обозначена на рисунке 4, не рассматривалась.



1 – коэффициенты аппроксимации $A_1(t)$; 2 – коэффициенты аппроксимации $A_2(t)$;
3 – коэффициенты аппроксимации $A_3(t)$

Рисунок 4. – Область асимптотической устойчивости выражения аппроксимации вязкости расплава на выходе из реактора ППК

Основное достоинство процедуры заключается в том, что для определения области устойчивости используются только коэффициенты аппроксимации $A_i(t)$, полученные в результате регуляризации.

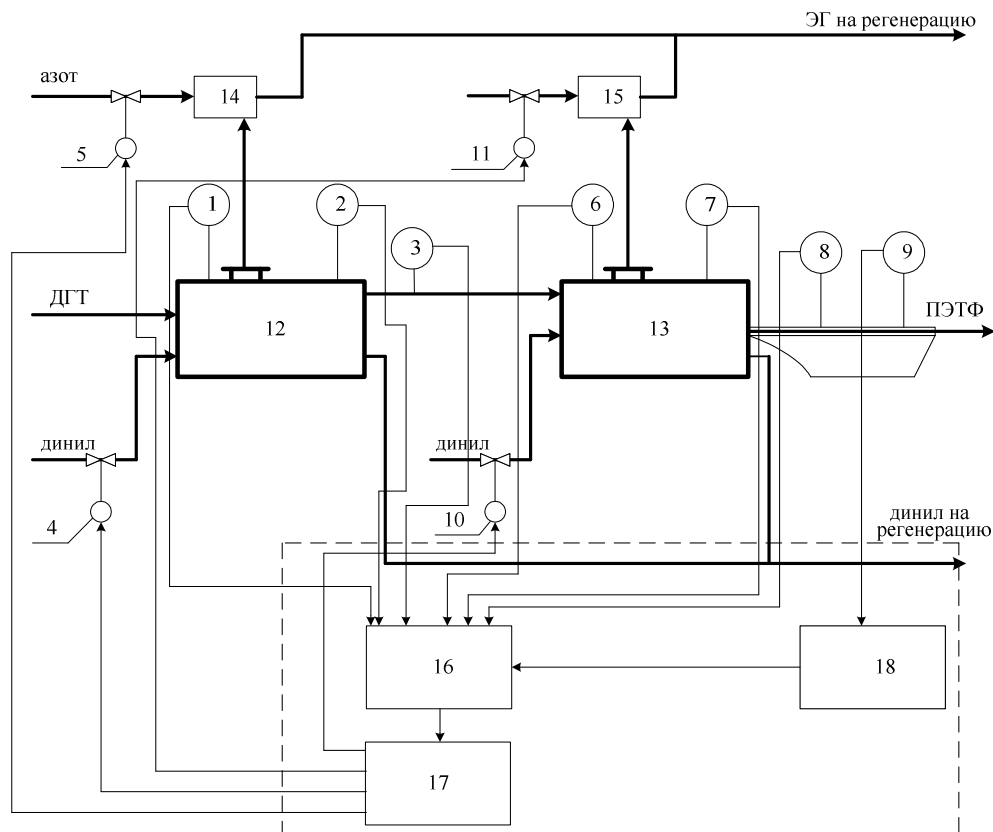
В четвертой главе разработан алгоритм, реализующий оптимальную адаптивную систему управления реакторами поликонденсации, и структура системы управления реакторами поликонденсации (рисунок 5). Включенный в структуру системы блок идентификации содержит выражения, коэффициенты в которых пересчитываются при изменении режимов работы реакторов ППК и ОПК.

Последовательно во времени определяются неизвестные переменные модели объекта и затем вычисляются оптимальные значения управляющих переменных исходя из предположения, что найденные оценки переменных совпадают с истинными значениями.

Алгоритм, реализующий оптимальную адаптивную систему управления реакторами поликонденсации, состоит из следующих этапов:

- сбор и обработка информации об объекте (блок 16);

- корректировка параметров модели, с учетом вновь поступивших данных о процессе (блоки 16, 18);
- определение оптимальных значений управляющих переменных по скорректированной модели (блок 17);
- реализация управления реакторами поликонденсации.



1, 6 – датчики температуры; 2,7 – преобразователи давления; 3, 8 – дроссельные системы для измерения вязкости; 4, 10 – исполнительные механизмы подачи динила; 5, 11 – исполнительные механизмы подачи азота на орошение этиленгликоля; 9 – средство измерения концентрации карбоксильных групп в ПЭТФ; 12, 13 – реакторы ППК, ОПК; 14, 15 – системы отгона этиленгликоля из реакторов ППК, ОПК; 16 – блок идентификации адаптивной системы управления процессом поликонденсации; 17 – блок оптимизации адаптивной системы управления процессом поликонденсации; 18 – блок вычисления концентрации карбоксильных групп в ПЭТФ

Рисунок 5. – Структура системы управления реакторами поликонденсации

В блоке идентификации системы управления происходит корректировка параметров математической модели процесса. Минимизация ошибки рассогласования параметров реального процесса и модели осуществляется путем регуляризации коэффициентов аппроксимации модели.

В блоке оптимизации рассчитываются оптимальные значения управляющих переменных, и осуществляется выработка управляющих воздействий согласно выражениям (16)–(19).

Для улучшения качества получаемого продукта в структуру оптимальной адаптивной системы включен блок вычисления концентраций карбоксильных групп в ПЭТФ со средством измерения концентрации карбоксильных групп

фотометрическим способом непосредственно в производственном процессе. Измеренные значения концентрации карбоксильных групп сравниваются с рассчитанными на основе выражений (1), (2) значениями и пропорционально величине рассогласования происходит корректировка управляющих воздействий.

При определении качества управления были найдены значения минимальной ошибки, которые в 4,5 раза меньше, чем в существующей системе, а быстродействие системы увеличилось на 14 % по сравнению с существующей системой, время срабатывания которой составляет 28 секунд, что говорит о повышении качества управления за счет блоков идентификации и оптимизации.

В результате внедрения вышеуказанной системы управления становится возможным ведение процесса при сниженных температурах и уменьшении давления вакуума. Таким образом, оптимизация значений управляющих переменных привела к снижению затрат электроэнергии на нагрев теплоносителя и работу насосов для удаления этиленгликоля из реакторов поликонденсации. На основании изменения данных характеристик рассчитана оценка эффективности от внедрения предлагаемой системы управления.

При реализации оптимальной адаптивной системы управления реакторами поликонденсации был получен продукт с улучшенными качественными показателями. Сниженная концентрация карбоксильных групп позволила улучшить эксплуатационные свойства полимера в процессе прядения, в результате чего сократилось количество разрывов пряжи на мотальных станках, ведущих к внеплановым простоям. Уменьшение простоя за год составило 0,039 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В соответствии с поставленной целью и очерченным кругом задач получены следующие научные и практические результаты.

1. Разработана математическая модель динамики процесса поликонденсации, включающая математическую модель кинетики и идентификацию динамических характеристик. Найдены значения концентраций веществ необходимые для определения степени полимеризации, которые входят в реакции, протекающие в реакторах поликонденсации [1, 21]. Проведена аппроксимация переменных процесса интегральными рядами Вольтерра, что позволило впервые исследовать нелинейные свойства процесса [2, 7, 8, 14, 19].

Разработана процедура регуляризации, используя которую удалось снизить ошибку идентификации вязкости на выходе из реактора ППК с 2,724 % до 2,271 %; расхода на выходе из реактора ППК с 6,56 % до 4,76 %; вязкости на выходе из реактора ОПК с 35,10 % до 14,99 %; расхода на выходе из реактора ОПК с 3,32 % до 3,01 % [3, 16, 20].

2. Разработан алгоритм поиска оптимальных значений управляющих пе-

ременных процесса поликонденсации, обоснован выбор интегрального критерия оптимизации [25]. Предложен метод определения весовых коэффициентов критерия оптимизации. Использование составленного алгоритма привело к увеличению быстродействия при вычислениях значений управляющих переменных и наглядному представлению оптимального решения [4, 9, 13, 15, 17, 24]. Предложена аппроксимация полученных оптимальных зависимостей на основе нелинейных законов управления [11]. Максимальная величина относительной погрешности аппроксимации составляет: для температуры в реакторе ППК – 3,4 %; для давления в реакторе ППК – 4,0 %; для температуры в реакторе ОПК – 2,6 %; для давления в реакторе ОПК – 3,8 % [26]. Полученные результаты дают возможность осуществлять расчет оптимальных значений управляющих переменных с целью получения энергосберегающего эффекта [5].

3. Разработана оригинальная процедура определения области устойчивости. Найдены границы области асимптотической устойчивости динамических характеристик модели процесса поликонденсации. Основное достоинство процедуры заключается в том, что для определения области устойчивости используются только коэффициенты аппроксимации, полученные в результате регуляризации [10, 23].

4. Реализована и внедрена в промышленность оптимальная адаптивная система управления. Алгоритм, реализующий оптимальную адаптивную систему управления реакторами поликонденсации, включает отдельные алгоритмы определения концентраций продуктов химических реакций процесса, идентификации и поиска оптимальных значений управляющих переменных процесса поликонденсации [4, 18, 22]. Впервые для производства полимера с требуемым значением степени полимеризации разработан и включен в систему управления блок измерения концентрации карбоксильных групп, позволяющий корректировать значения управляющих переменных [6, 12]. Разработанные алгоритмы улучшают качество управления путем снижения значения минимальной ошибки, увеличения быстродействия системы и обеспечивают получение продукта более высокого качества.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Программное обеспечение, разработанное в ходе диссертационной работы, может применяться для определения динамических характеристик, а также при создании систем управления поликонденсационными процессами. Алгоритмы внедрены и используются в технологическом процессе получения полиэтилентерефталата в производстве органического синтеза на ОАО «Могилевхимволокно». Высокое качество продукта, полученного после внедрения оптимальной адаптивной системы управления реакторами поликонденсации, подтверждено практическим использованием полиэтилентерефталата в прядильном производстве на ЗАО СП «Сопотекс».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Алданова, И.В. Математическое описание динамики процесса поликонденсации / И.В. Алданова, И.Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2008. – Вып. XVI. – С. 82–86.
2. Алданова, И.В. Идентификация динамических характеристик процесса поликонденсации / И.В. Алданова, И.Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2009. – Вып. XVII. – С. 86–89.
3. Aldanova, I. The mathematical description of technological processes in dynamics / I. Aldanova, I. Ivanova // Annals of Warsaw University of Life Sciences–SGGW (Agriculture). – 2010. – Vol. 55. – P. 105–111.
4. Акиншева, И.В. Синтез адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 104–108.
5. Акиншева, И.В. Экономия энергетических затрат в производстве полиэтилентерефталата / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Энергия и менеджмент. – 2010. – № 1. – С. 29–32.
6. Акиншева, И.В. Автоматическое измерение качественных показателей полиэтилентерефталата на стадии поликонденсации / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2011. – № 6(144). – С. 74–77.
7. Акиншева, И.В. Особенности идентификации динамики химических реакторов на основе рядов Вольтерра / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий, И.М. Карраскель // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2012. – № 6(153). – С. 113–117.
8. Акиншева, И. В. Идентификация процессов синтеза карбамида и полиэтилентерефталата / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий, И.М. Карраскель // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2013. – № 6(162). – С. 104–107.
9. Акиншева, И.В. Особенности интегрального оценивания многомерных объектов и алгоритмов управления / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2014. – № 6(170). – С. 83–86.
10. Akinsheva, I.V. Исследование устойчивости нелинейных объектов / I.V. Akinsheva, I.D. Ivanova, E. Kaminski // Problemy Inzynierii Rolniczej. – 2016. – Vol. 1(91). – P. 41–52.

Материалы конференций

11. Акиншева, И.В. Формирование оптимальных управляющих воздействий процесса поликонденсации / И.В. Акиншева // Информационные технологии и системы 2011 (ИТС 2011): материалы международной научной конфе-

ренции, БГУИР, Минск, Беларусь, 26 октября 2011 г / редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 68–69.

12. Акиншева, И.В. Построение адаптивной системы управления процессом поликонденсации с контуром коррекции по содержанию карбоксильных групп в полиэтилентерефталате / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Волокна и пленки 2011: перспективные технологии и оборудование для производства и переработки волокнистых и пленочных материалов: материалы международной научно-практической конференции-семинара, Могилев, 28 октября 2011 г. / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО «МГУП», 2011. – С. 141–145.

13. Aldanova, I. Optimisation of the dynamic characteristics of technological processes / I. Ivanova, I. Aldanova // International Scientific Conference MANAGEMENT 2012, Mladenovac, Serbia, 20–21 April 2012 / for publisher: M. Bovac [and pl.]. – Belgrad: University Union of Belgrad, 2012. – С. 268–273.

14. Акиншева, И.В. Методика решения задач идентификации объектов методом ряда Вольтерра / И.В. Акиншева, И.М. Карраскель // Информационные технологии и управление 2012: материалы 48-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, 7–11 мая 2012 г). – Минск: БГУИР, 2012. – С. 108.

Тезисы докладов

15. Алданова, И.В. Многокритериальная оптимизация реактора поликонденсации при производстве полимера полиэтилентерефталата / И.В. Алданова // Техника и технология пищевых производств – 2007: тез. докл., Могилев, 23–24 апреля 2007 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2007. – С. 38.

16. Алданова, И.В. Идентификация динамических характеристик процесса поликонденсации с использованием рядов Вольтерра второго рода / И.В. Алданова, И.Ф. Кузьмицкий // Техника и технология пищевых производств – 2009: тез. докл., Могилев, 21–22 мая 2009 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2009. – С. 56.

17. Алданова, И.В. Оптимальное управление процессом поликонденсации / И.В. Алданова, И.Ф. Кузьмицкий // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов – 2009: тез. докл., Минск, 28–29 октября 2009 г. / Бел. гос. технол. ун-т. – Минск, 2009. – С. 12.

18. Акиншева, И.В. Построение адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И.В. Акиншева, Н.Н. Дорогов // Техника и технология пищевых производств – 2010: тез. докл., Могилев, 23–24 апреля 2010 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2010. – С. 56.

19. Акиншева, И.В. Математическое моделирование стадии поликонден-

сации в производстве полиэтилентерефталата / И.В. Акиншева // Математическое и имитационное моделирование систем МОДС'2010: тез. докл., г.Киев, 21–25 июня 2010 г. / Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка. – Киев, 2010. – С. 32.

20. Акиншева, И.В. Идентификация динамических характеристик существенно нелинейных объектов / И.В. Акиншева // Системный анализ и информационные технологии: материалы Международной научно-технической конференции SAIT 2011, Киев, 23–28 мая 2011 г. – К.: УНК «ИПСА» ННТУ «КПИ», 2011. – С. 49.

21. Акиншева, И.В. Математическое моделирование кинетики процесса поликонденсации / И.В. Акиншева, Н.Н. Дорогов // Техника и технология пищевых производств – 2011: тез. докл., Могилев, 27–28 апреля 2011 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2011. – С. 108.

22. Акиншева, И.В. Комплексная реализация адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Техника и технология пищевых производств – 2011: тез. докл., Могилев, 27–28 апреля 2011 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2011. – С. 107.

23. Акиншева, И.В. Анализ устойчивости адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И.В. Акиншева // Техника и технология пищевых производств – 2011: тез. докл., Могилев, 27–28 апреля 2011 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2011. – С. 109.

24. Акиншева, И.В. Особенности оптимизации многопараметрических объектов химической промышленности / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Техника и технология пищевых производств – 2012: тез. докл., Могилев, 26–27 апреля 2012 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2012. – С. 93.

25. Акиншева, И.В. Многопараметрическая оптимизация нелинейных объектов химической промышленности / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Техника и технология пищевых производств – 2013: тез. докл., Могилев, 25–26 апреля 2013 г. в 2 ч. / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2013. – Ч.2. – С. 64.

26. Акиншева, И.В. Оптимизация многомерных объектов химической промышленности / И.В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Техника и технология пищевых производств – 2014: тез. докл., Могилев, 24–25 апреля 2014 г. в 2 ч. / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – Ч.2. – С. 106.

РЭЗІЮМЭ

Акіншэва Ірына Уладзіславаўна

Аптымальнае кіраванне рэактарамі полікандэнсацыі ў вытворчасці поліэтылентэрэфталату

Ключавыя словы: поліэтылентэрэфталат, полікандэнсацыя, кінетыка хімічных працэсаў, ідэнтыфікацыя дынамічных характарыстык, рэгулярызацыя, крытэрыі аптымізацыі, законы кіравання, карбаксільныя групы, аптымальная адаптыўная сістэма кіравання.

Мэта даследавання: скарачэнне выдаткаў на энергарэсурсы і павышэнне якасці поліэтылентэрэфталату за кошт пабудовы аўтаматызаванай адаптыўнай сістэмы кіравання рэактарамі полікандэнсацыі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана матэматычная мадэль працэсу полікандэнсацыі, адметнай асаблівасцю якой з'яўляецца вызначэнне канцэнтрацый прадуктаў рэакцый і магчымасць ідэнтыфікацыі дынамічных характарыстык аб'екта даследавання з высокай ступенню дакладнасці, якая дасягаецца за кошт выкарыстання працэдуры рэгулярызацыі каэфіцыентаў апраксімацыі мадэлі; распрацаваны алгарытм пошуку аптымальных значэнняў кіруючых пераменных, заснаваны на мінімізацыі крытэрыю аптымізацыі выкарыстумай мадэлі; складзены законы кіравання, якімі праведзена апраксімацыя вынікаў аптымізацыі; распрацавана працэдура вызначэння вобласці ўстойлівасці, дзякуючы якой вызначаюцца межы асімптатычнай ўстойлівасці дынамічных характарыстык працэсу; распрацаваны алгарытм і структура аптымальнай адаптыўнай сістэмы кіравання рэактарамі полікандэнсацыі, якая ўключае блок вылічэння канцэнтрацыі карбаксільных груп у палімеры, што дазваляе выканаць перабудову параметраў матэматычнай мадэлі пры змене рэжымаў работы апаратаў, знізіць выдаткі на электраэнергію і павысіць якасць поліэтылентэрэфталату.

Вобласць прымянення: вытворчасць палімераў, у прыватнасці поліэтылентэрэфталату маркі Д і на яго аснове тканіны тэхнічнага прызначэння, што пацверджана ўкараненнем і выкарыстаннем вынікаў даследавання ў хімічным цэху Завода арганічнага сінтэзу ААТ «Магілёўхімвалакно» а таксама ў прадзельным цэху ЗАТ СВ «Сапатэкс».

РЕЗЮМЕ

Акиншева Ирина Владиславовна

Оптимальное управление реакторами поликонденсации в производстве полиэтилентерефталата

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, поликонденсация, кинетика химических процессов, идентификация динамических характеристик, регуляризация, критерий оптимизации, законы управления, карбоксильные группы, оптимальная адаптивная система управления.

Цель работы: сокращение затрат на энергоресурсы и повышение качества полиэтилентерефталата за счет построения автоматизированной адаптивной системы управления реакторами поликонденсации.

Полученные результаты и их новизна: разработана математическая модель процесса поликонденсации, отличительной особенностью которой является определение концентраций продуктов реакций и возможность идентификации динамических характеристик объекта исследования с высокой степенью точности, достигающейся за счет использования процедуры регуляризации коэффициентов аппроксимации модели; разработан алгоритм поиска оптимальных значений управляющих переменных, основанный на минимизации критерия оптимизации используемой модели; составлены законы управления, которыми произведена аппроксимация результатов оптимизации; разработана процедура определения области устойчивости, благодаря которой определяются границы асимптотической устойчивости динамических характеристик процесса; разработаны алгоритм и структура оптимальной адаптивной системы управления реакторами поликонденсации, включающая блок вычисления концентрации карбоксильных групп в полимере, что позволяет производить настройку параметров математической модели при изменении режимов работы аппаратов, снизить затраты на электроэнергию и повысить качество полиэтилентерефталата.

Область применения: производство полимеров, в частности, полиэтилентерефталата марки Д и на его основе ткани технического назначения, что подтверждено внедрением и использованием результатов исследования в химическом цехе Завода органического синтеза ОАО «Могилевхимволокно», а также в прядильном цехе ЗАО СП «Сопотекс».

SUMMARY

Irina V. Akinsheva

Optimal control of polycondensation reactors in the production of polyethylene terephthalate

Key words: polyethylene terephthalate, polycondensation, the kinetics of chemical processes, the identification of dynamic objects, regularization, optimization, quality criteria, carboxyl groups, the synthesis of an adaptive process control system.

The aim of research: To reduce energy costs and increase the quality of polyethylene terephthalate by creating the automatic adaptive system that controls the reactors of polycondensation.

The results obtained and their novelty: a mathematical model of the polycondensation of specific in the determination of the concentrations of the products of the reactions and the ability to identify the dynamic characteristics of the object of study with a high degree of accuracy has been generated by using the regularization procedure of approximation coefficients; an algorithm for optimal values of the control variables, based on the minimization of a quadratic criterion of quality of the model used has been developed; definite control laws, which were used for conducting the approximation of the optimization results, have been written; the technique of determining the area of sustainability, which is used for defining the boundaries of setting a process variables, has been worked out; the structure and algorithm of the optimization adaptive control system for the polycondensation reactors, including calculation unit concentration of the carboxyl groups in the polymer, has been developed, which allows to reconstruct the parameters of the mathematical model when changing modes of the percolation reactors, to reduce energy costs and improve the quality of polyethylene terephthalate.

Applications: production of polymers, in particular polyethylene terephthalate grade D and on the basis of technical designation tissue, which is confirmed by the introduction and use of research results in a chemical factory shop of organic synthesis JSC «Mogilevkhimvolokno», as well as in the spinning mill CJSC JV «Sopoteks».

Научное издание

Акиншева Ирина Владиславовна

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕАКТОРАМИ
ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л.

Формат 60×84 1/16
Отпечатано на ризографе
Тираж __ экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/238 от 24.03.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6