

Е.Алексеев

**АЛЕКСЕЕВ Евгений Алексеевич**

**АНАЛИЗ, ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ  
ТВЕРДОФАЗНОГО ДОПОЛИАМИДИРОВАНИЯ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(в химических технологиях, нефтехимии)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет».

**Научный руководитель:** **Лабутин Александр Николаевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Холоднов Владислав Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник высшей школы РФ,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (технический  
университет)», кафедра системного анализа и  
информационных технологий, профессор

**Тихомиров Сергей Германович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
университет инженерных технологий», кафедра  
информационных и управляющих систем, профессор

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Защита состоится «21» декабря 2020 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.063.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7, ауд. Г-205.

Тел./факс: (4932) 32-54-33, e-mail: [dissovet@isuct.ru](mailto:dissovet@isuct.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного химико-технологического университета по адресу: 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 10 и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ИГХТУ» <https://www.isuct.ru/> по ссылке: [https://www.isuct.ru/sites/default/files/department/ighu/dissertacionnye-sovety/files/alekseev\\_evgeniy\\_alekseevich-08102020/alekseev\\_dissertation.pdf](https://www.isuct.ru/sites/default/files/department/ighu/dissertacionnye-sovety/files/alekseev_evgeniy_alekseevich-08102020/alekseev_dissertation.pdf)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.063.05, д.ф.-м.н., профессор

Галина Альбертовна Зуева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность.** Полиамид-6 (ПА-6) благодаря своим свойствам находит широкое применение в различных отраслях промышленности: пищевой, станкостроительной, химической (целлюлозно-бумажной, нефтехимической), судостроительной, металлургической, текстильной, а также в медицине. В основном его используют в виде полимерных волокон.

Традиционно полиамид-6 получают путём полимеризации капролактама в расплаве при температурах 250÷270 °С. Недостатками этого подхода являются низкая энерго- и ресурсоэффективность и повышенное содержание низкомолекулярных соединений в полимере.

Проблема повышения ресурсо- и энергоэффективности производственного процесса получения ПА-6 ставилась и решалась многими исследователями. Учёными ИГХТУ (Л.Н. Мизеровским, Ю.М. Базаровым, А.А. Липиным, А.К. Кузнецовым) усовершенствовано аппаратурно-технологическое оформление производственного процесса: в технологическую схему введены стадии дополиамидирования в твёрдой фазе и совмещённого процесса сушки и удаления остаточного мономера в потоке инертного газа вместо стадии экстракции и регенерации лактамных вод. Предложено конструктивное оформление реактора-дополимеризатора, но не до конца решена задача оптимизации процесса.

Эффективное функционирование реактора на стадии эксплуатации в существенной степени определяется эффективностью соответствующей системы управления объектом. Трудности и проблемы создания такой системы определяются сложностью объекта управления, его многомерностью, отсутствием полной информации о модели процесса.

Сказанное определяет актуальность и необходимость проведения исследований по системному анализу комплекса «реактор-дополимеризатор – подсистема управления». Это делает тему работы актуальной.

Диссертационная работа выполнялась в рамках приоритетного направления научных исследований ИГХТУ на период 2018-2022 гг. «Компьютерное моделирование и информационная поддержка технологических процессов и систем» по теме «Теоретические основы анализа, оптимизации и управления ресурсосберегающими многопродуктовыми реакторными системами», раздел «Разработка прикладной теории синтеза систем управления химическими реакторами».

**Степень разработанности темы.** В настоящее время проводится достаточно много исследований по тематике системного анализа сложных гетерофазных процессов и разработке алгоритмов управления ими. Основоположником системного анализа процессов химической технологии в нашей стране является академик В.В. Кафаров. Существенный вклад в решение проблем оптимального синтеза и анализа химико-технологических процессов внесли отечественные учёные: академик РАН В.П. Мешалкин, профессора Г.М. Островский, И.Н. Дорохов, Л.С. Гордеев, С.И. Дворецкий, Н.В. Меньшутина, Э.М. Кольцова, В.А. Холоднов, А.Н. Лабутин, Т.Б. Чистякова и др. Проблемы автоматизации и управления химико-технологическими процессами рассматривались в работах А.Э. Софиева, В.С. Балакирева, Е.Г. Дудникова и др. В области синтеза систем управления методами модального управления необходимо отметить работы Н.Т. Кузовкова, С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, А.Р. Гайдука.

Однако в настоящее время в литературе недостаточно работ, посвящённых математическому моделированию стадии твердофазного дополиамидирования и анализу

реактора-дополимеризатора как объекта управления. Вопросы синтеза и реализации алгоритмов управления данным технологическим процессом практически не рассматривались.

Таким образом, задача разработки полной математической модели процесса твердофазного дополиамидирования, технологической оптимизации и синтеза алгоритмов управления реактором является актуальной.

**Объект исследования:** комплекс «реактор твердофазного дополиамидирования – подсистема управления».

**Предмет исследования:** системный анализ двухфазного процесса дополиамидирования как объекта управления и структурно-параметрический синтез алгоритмов управления объектом.

**Цель работы:** анализ и синтез работоспособного комплекса «реактор твердофазного дополиамидирования – управляющая подсистема», удовлетворяющего заданным показателям качества и эффективности.

Для достижения поставленной цели исследования, необходимо решить следующие **задачи:**

- 1) С использованием методологии системного анализа разработать математическую модель двухфазного реактора-дополимеризатора, отражающую явления на микроуровне (кинетика химических превращений), на уровне одиночной твердой частицы, взаимодействующей с паро-газовой фазой, на уровне элементарного объема и на уровне аппарата в целом.
- 2) Сформулировать и решить задачу технологической оптимизации реактора.
- 3) Провести редукцию полной математической модели технологического процесса и получить формализованную модель динамики объекта по различным динамическим каналам.
- 4) Синтезировать алгоритмы управления многомерным объектом, позволяющие управлять не только температурным режимом, но и регулировать степень превращения мономера при действии возмущений.
- 5) Методами вычислительного эксперимента провести исследование работоспособности и эффективности функционирования комплекса «реактор-дополимеризатор – подсистема управления» в условиях действия возмущений.
- 6) Разработать программно-алгоритмические средства для исследования и имитационного моделирования комплекса «реактор – управляющая подсистема».

**Методология и методы исследования:**

В работе использовалась методология системного анализа (декомпозиция, анализ, синтез), методы математического моделирования, вычислительного эксперимента и теории управления.

**Научная новизна:**

С использованием методологии системного анализа сложных физико-химических систем как объектов управления:

- 1) Разработана полная математическая модель двухфазного реактора-дополимеризатора, отражающая явления на микроуровне, на уровне одиночной твердой частицы, взаимодействующей с паро-газовой фазой, на уровне элементарного объема и на уровне аппарата в целом.
- 2) Уточнены параметры кинетической модели твердофазного дополиамидирования для условий «глубокого» превращения мономера при температуре  $\approx 180$  °С.

3) Определена и предложена формализованная модель динамики реактора в форме передаточных функций по различным динамическим каналам для решения задач синтеза алгоритмов управления.

4) Впервые проведены исследования в области управления процессом твердофазного дополиамидирования – предложена структура и проведён параметрический синтез алгоритмов управления температурой твёрдых частиц и концентрацией мономера с целью их стабилизации на оптимальном уровне в условиях действия возмущений.

#### **Практическая значимость:**

1) Разработаны программные средства решения задач системного анализа реактора-дополимеризатора и системы управления процессом, а именно:

- программное средство для решения задачи технологической оптимизации (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663488);

- программа решения задачи параметрической идентификации модели кинетики при заданной температуре;

- программное средство для реализации вычислительного эксперимента при имитационном моделировании комплекса «реактор – управляющая подсистема».

2) Предложена методика и определены оптимальные значения нагрузки на аппарат по твёрдой фазе и расхода теплоносителя при заданных конструктивных параметрах реактора, обеспечивающие максимальную степень превращения капролактама и заданное значение температуры твёрдых гранул.

3) Сформулированы рекомендации по структуре алгоритмов управления температурой твёрдых частиц и концентрацией капролактама при решении задачи стабилизации данных параметров в условиях действия возмущений.

4) Результаты исследований рекомендуются к использованию в учебном процессе при подготовке магистров по направлению «Управление в технических системах».

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.13.01.** Объект и предмет исследования диссертационной работы, основные научно-практические результаты исследований соответствуют:

а) формуле специальности в части «... специальность, занимающаяся проблемами разработки и применения методов системного анализа сложных прикладных объектов исследования..., включая вопросы анализа, моделирования и оптимизации, совершенствования управления..., с целью повышения эффективности функционирования объектов исследования»;

б) области исследований:

п.2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления...»

п.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления...»

п.5 «Разработка специального...алгоритмического обеспечения систем... управления».

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Математическая модель процесса твердофазного дополиамидирования, протекающего в реакторе непрерывного типа, учитывающая кинетику химических реакций, процессы массо- и теплообмена между твёрдой и газовой фазами.

2) Постановка и решение задачи оптимизации процесса твердофазного дополиамидирования.

3) Формализованная модель динамики реактора по различным каналам..

4) Алгоритмы управления температурой гранул и концентрацией капролактама в грануле.

5) Результаты исследования работоспособности и эффективности комплекса «реактор – подсистема управления»..

**Обоснованность научных положений и достоверность результатов** обеспечивается использованием фундаментальных законов переноса субстанций при разработке математической модели двухфазной физико-химической системы, методов современной теории управления и подтверждается удовлетворительным соответствием расчетных и экспериментальных данных, непротиворечием результатов вычислительного эксперимента теоретическим положениям.

**Личный вклад автора.** Анализ литературной информации, теоретические и экспериментальные исследования, результаты работы получены Алексеевым Е.А. лично под руководством д.т.н., проф. Лабутина А.Н.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих международных конференциях: Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-27, Иваново, 2014; ММТТ-28, Ярославль, 2015; ММТТ-29, Санкт-Петербург, 2016; ММТТ-32, Санкт-Петербург, 2019), XI Международный научно-технический симпозиум «Теоретические и экспериментальные основы создания энерго- и ресурсосберегающих процессов и оборудования» (ЭРПО-2014) посвященный 85-летию академика РАН А.М. Кутепова (Иваново, 2014), XIII Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование» (Иваново, 2018), VIII Международная научная конференция «Кинетика и механизм кристаллизации. Кристаллизация как форма самоорганизации вещества» (Иваново, 2014), Кластер конференций-2018 (Суздаль, 2018), Всероссийский молодежный конкурс «ЛЕГПРОМНАУКА» (Иваново, 2018, 2019).

**Публикации:** По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 3 статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, и одна статья в зарубежном журнале Technical Transactions. Mechanics, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём работы:** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 14 таблиц и 50 рисунков. Список литературы включает 122 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** представлен анализ научно-технической литературы по тематике исследования. Показано, что полимер, пригодный для формования из него нитей, получают способом гидrolитической полимеризации капролактама. В главе приведены основные технологические схемы проведения этого процесса. Показана перспективная схема получения полимера. Отмечены основные особенности управления химико-технологическими процессами. Проведён анализ проблем автоматизации и управления промышленным процессом получения полиамида-6. На основании анализа литературы сформулированы цель и основные задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена моделированию процесса дополиамидирования. Для проведения полупромышленного процесса твердофазного дополиамидирования полиамида-6 предлагается использовать реактор, представляющий собой

цилиндрическую ёмкость, снабжённую рубашкой обогрева и перемешивающим устройством, которая частично заполнена гранулами полимера. Содержимое реактора образует двухфазную систему: парогазовая фаза и твёрдые гранулы полимера. Процесс организуется так, чтобы гранулы «омывались» потоком газа. При этом реактор может функционировать как в периодическом, так и в непрерывном режиме.

Принципиальная схема пилотного реактора представлена на рисунке 1.

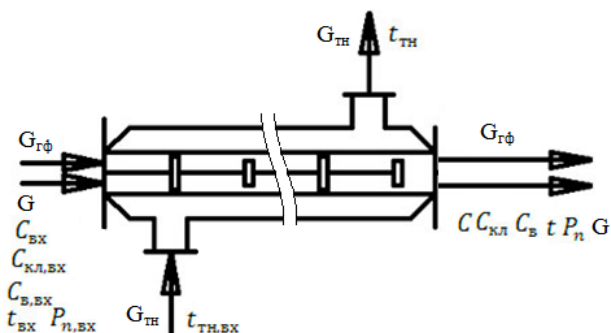


Рисунок 1. Принципиальная схема пилотного реактора-дополимеризатора

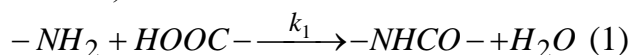
полимера на входе в аппарат;  $t$  – температура гранул в аппарате;  $t_{тн}$  – температура теплоносителя;  $P_n$  – степень полимеризации ПА-6 после реактора.

Совокупность физико-химического процесса дополиамидирования и его аппаратного оформления образуют сложную физико-химическую систему (ФХС), в которой протекают процессы и явления различного масштабного уровня:

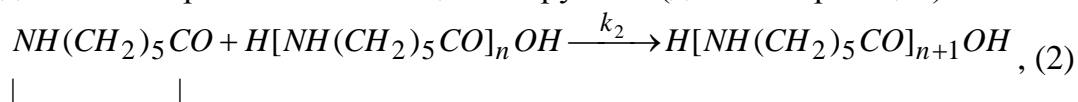
- процессы на молекулярном уровне – химическое взаимодействие реагентов в твердой грануле;
- физико-химические процессы на уровне единичной гранулы полимера и процессы взаимодействия с «омывающим» частицу газом;
- процессы на уровне элементарного объёма аппарата, отражающие макроскопический перенос вещества и энергии в объёме, взаимодействие фаз между собой и с ограничивающими поверхностями аппарата;
- процессы в масштабе реактора, отражающие организацию ввода в аппарат исходных веществ, их выгрузку, способ внешнего подвода теплоты.

Если гранулы нагреть, не доводя до температуры плавления, и выдержать, то будет протекать процесс твердофазного дополиамидирования. В результате этого происходит повышение степени полимеризации полимера и снижение концентрации мономера. Из литературы известно, что при этом протекают две основные реакции:

- взаимодействие контактных пар, образованных концевыми amino- и карбоксильными группами (дополиконденсация):



- присоединение капролактама к концевым группам (дополимеризация):



где  $k_1, k_2$  – константы скорости реакций.

На молекулярном уровне процесс характеризуется протеканием описанной выше химической реакции в грануле полимера. При этом гранула рассматривается как квазигомогенный микрореактор. Для описания химических превращений используется математическая модель кинетики реакций, которая имеет вид (3):

$$\begin{cases} \frac{dC}{d\tau} = -k_1(C - C_p), \\ \frac{dC_{кл}}{d\tau} = -k_2 C(C_{кл} - C_{кл,p}), \\ \frac{dC_в}{d\tau} = k_1(C - C_p), \end{cases} \quad (3)$$

где  $C$ ,  $C_{кл}$ ,  $C_в$  – концентрации концевых групп макромолекул, капролактама и воды в гранулах соответственно;  $k_1$ ,  $k_2$  – константы скорости реакций;  $C_p$ ,  $C_{кл,p}$  – равновесные значения концентраций концевых групп и капролактама.

Наряду с химическими превращениями в грануле протекают процессы массо- и теплопереноса и процессы взаимодействия с «омывающим» частицу газом. Математическое описание процессов в грануле, имеет вид (4):

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} = w_{гр}(\bar{C}, t), \\ \frac{\partial C_{кл}}{\partial \tau} = w_{кл}(\bar{C}, t) + D_{кл} \left( \frac{\partial^2 C_{кл}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_{кл}}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial C_в}{\partial \tau} = w_в(\bar{C}, t) + D_в \left( \frac{\partial^2 C_в}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_в}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_{эф} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) - q_{кл} r_{п}^{кл} - q_в r_{п}^в \end{cases} \quad (4)$$

где  $D_{кл}$  и  $D_в$  – эффективные коэффициенты диффузии капролактама и воды соответственно;  $\alpha_{эф}$  – эффективный коэффициент температуропроводности;  $r_{п}^{кл}$ ,  $r_{п}^в$  – скрытые теплоты парообразования капролактама и воды;  $q_{кл}$ ,  $q_в$  – поток паров капролактама и воды;  $w_{гр}(\bar{C}, t)$ ,  $w_{кл}(\bar{C}, t)$ ,  $w_в(\bar{C}, t)$  –

уравнения кинетики химических реакций (3).

Начальные условия:  $\tau = 0: C(r) = C^0, C_{кл}(r) = C_{кл}^0, C_в(r) = C_в^0, t(r) = t^0$ .

Граничные условия:

$$r = 0: \frac{\partial C}{\partial r} = 0; \frac{\partial C_{кл}}{\partial r} = 0, \frac{\partial C_в}{\partial r} = 0, \frac{\partial t}{\partial r} = 0$$

$$r = R: -D_{кл} \frac{\partial C_{кл}}{\partial r} = \beta_{кл} (C_{кл}^п - C_{кл}^{гф}), -D_в \frac{\partial C_в}{\partial r} = \beta_в (C_в^п - C_в^{гф}), -\lambda_{эф} \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha (t_{гф} - t),$$

где  $\beta_{кл}$  и  $\beta_в$  коэффициенты массоотдачи капролактама и воды;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $t$  – температура гранулы;  $t_{гф}$  – температура газовой фазы;  $\lambda_{эф}$  – коэффициент теплопроводности;  $C_{кл}^п$ ,  $C_в^п$  – концентрации капролактама и воды на поверхности гранулы.

Недостатки представленной модели, ограничивающие возможности её использования, заключаются в следующем. Прежде всего, это большое число параметров, входящих в уравнения математического описания (10 коэффициентов), что делает задачу параметрической идентификации модели практически нереализуемой. Вторая неприятная особенность заключается в том, что модель предполагает диффузию воды и капролактама в жидкофазной форме и испарение этих компонентов в пограничном слое, что, очевидно, не полностью соответствует физической картине процесса. К недостаткам модели необходимо отнести и трудность решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с краевыми условиями III рода.

Перечисленные обстоятельства предполагают упрощение модели. С этой целью были сделаны некоторые упрощающие допущения. Основное допущение – это предположение о достаточно большом значении коэффициентов диффузии ( $D_{кл} \rightarrow \infty$ ,  $D_в \rightarrow \infty$ ), что означает равномерность распределения концентраций и температуры по радиусу гранулы. Такое допущение позволяет считать гранулы полимера микрореактором «идеального смешения», обменивающимся веществом и энергией с газовой фазой. Поскольку капролактама и вода переходят в газовую фазу в виде паров, движущую силу процесса массоотдачи правильнее выразить через разницу парциальных



давлений компонентов у поверхности частицы и в ядре газовой фазы, а движущую силу процесса теплоотдачи как разницу температур гранулы и газовой фазы. При сформулированных допущениях уравнения математической модели, описывающие процессы в грануле, примут вид (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC}{d\tau} = -k_1(C - C_p), \\ \frac{dC_{кл}}{d\tau} = -k_2 C(C_{кл} - C_{кл,p}) - \beta_{p,кл} S(P_n^{кл} - P_c^{кл}), \\ \frac{dC_B}{d\tau} = k_1(C - C_p) - \beta_{p,B} S(P_n^B - P_c^B), \\ \frac{dt}{d\tau} = \alpha_{эф} S(t_{гф} - t) - \beta_{p,кл} S(P_n^{кл} - P_c^{кл}) r_{кл} - \beta_{p,B} S(P_n^B - P_c^B) r_B, \end{array} \right. \quad (5),$$

где  $S$  – эффективная поверхность гранулы;  $P_n^{кл}$ ,  $P_n^B$  – парциальные давления паров капролактама и воды над поверхностью гранулы;  $P_c^{кл}$ ,  $P_c^B$  – парциальные давления паров мономера и воды в

парогазовой среде. Начальные условия:  $\tau = 0$ ;  $C = C^0$ ,  $C_{кл} = C_{кл}^0$ ,  $C_B = C_B^0$ ,  $t = t^0$ .

Следующий масштабно-иерархический уровень ФХС – это элемент объёма реактора. Математическая модель на данном уровне отражает: перенос вещества и теплоты в масштабе элемента посредством конвективных потоков; тепло- и массообмена между фазами и теплопередачи от теплоносителя через стенку к твёрдой и газовой фазам. В предположении, что двухфазный поток (газ-твёрдое) перемещается вдоль оси аппарата в режиме идеального вытеснения, синтезирована математическая модель реактора-дополимеризатора с распределёнными по длине параметрами в форме системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями.

С целью упрощения процедур решения задач моделирования и оптимизации объекта, синтеза алгоритмов управления и исследования их эффективности проведена дискретизация модели (с учётом конструктивных особенностей аппарата) по пространственной координате путём перехода к ячеечной модели. Математическое описание ячейки – это система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (6). В системе (6) используются следующие обозначения:  $C^i$ ,  $C_{кл}^i$ ,  $C_B^i$  – концентрации концевых групп, капролактама и воды в гранулах полимера соответственно на выходе  $i$ -той ячейки;  $m_c^{кл i}$ ,  $m_c^{B i}$  – концентрации паров капролактама и воды в парогазовой среде на выходе  $i$ -той ячейки;  $t^i$  – температура гранул на выходе  $i$ -той ячейки;  $t_{mn}^i$  – температура теплоносителя на выходе  $i$ -той ячейки;  $i = \overline{1, N}$ , где  $N$  – количество ячеек, которыми аппроксимирован аппарат;  $C_p$ ,  $C_{кл,p}$  – равновесные значения концентраций концевых групп и капролактама;  $\beta_{p,кл}$ ,  $\beta_{p,B}$  – коэффициенты массоотдачи капролактама и воды соответственно при выражении движущей силы как разности парциальных давлений;  $P_n^{кл}$ ,  $P_n^B$  – парциальные давления паров капролактама и воды над поверхностью гранул;  $P_c^{кл}$ ,  $P_c^B$  – парциальные давления паров капролактама и воды в парогазовой среде в свободном объёме аппарата;  $d_{зр}$  – средний диаметр гранул;  $\rho_{тв}$  – плотность ПА-6;  $M_{кл}$ ,  $M_B$  – молярные массы капролактама и воды;  $\varphi$  – степень заполнения аппарата;  $\varepsilon$  – порозность слоя гранул;  $c_{тв}$  – удельная теплоёмкость ПА-6;  $K_T$  – коэффициент теплопередачи от стенки аппарата к гранулам;  $r_n^{кл}$ ,  $r_n^B$  – скрытые теплоты парообразования капролактама и воды;  $S_{вн}$ ,  $S_a$  – площади внешнего и внутреннего поперечного сечения аппарата.

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dC^i}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{гр.}}}{V} (C^{i-1} - C^i) - k_1 (C^i - C_p), \\
\frac{dC_{\text{кл}}^i}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{гр.}}}{V} (C_{\text{кл}}^{i-1} - C_{\text{кл}}^i) - k_2 C^i (C_{\text{кл}}^i - C_{\text{кл,п}}) - \frac{6000\beta_{\text{р,кл}}}{M_{\text{кл}} d_{\text{гр}} \rho} (P_{\text{п}}^{\text{кл}} - P_{\text{с}}^{\text{кл}}), \\
\frac{dC_{\text{в}}^i}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{гр.}}}{V} (C_{\text{в}}^{i-1} - C_{\text{в}}^i) + k_1 (C^i - C_p) - \frac{6000\beta_{\text{р,в}}}{M_{\text{в}} d_{\text{гр}} \rho} (P_{\text{п}}^{\text{в}} - P_{\text{с}}^{\text{в}}), \\
\frac{dm_{\text{с}}^{\text{кл}i}}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{г.ф.}}}{V_{\text{с}}} (m_{\text{с}}^{\text{кл}i-1} - m_{\text{с}}^{\text{кл}i}) + \frac{6\varphi(1-\varepsilon)\beta_{\text{р,кл}}}{[1-\varphi(1-\varepsilon)]d_{\text{гр}}} (P_{\text{п}}^{\text{кл}} - P_{\text{с}}^{\text{кл}}), \\
\frac{dm_{\text{с}}^{\text{в}i}}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{г.ф.}}}{V_{\text{с}}} (m_{\text{с}}^{\text{в}i-1} - m_{\text{с}}^{\text{в}i}) + \frac{6\varphi(1-\varepsilon)\beta_{\text{р,в}}}{[1-\varphi(1-\varepsilon)]d_{\text{гр}}} (P_{\text{п}}^{\text{в}} - P_{\text{с}}^{\text{в}}), \\
\frac{dt^i}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{гр.}}}{V} (t^{i-1} - t^i) + \frac{4K_{\text{т}}}{d\sqrt{\varphi(1-\varepsilon)}\rho_{\text{ТВ}}c_{\text{ТВ}}} (t_{\text{ТН}}^i - t^i) - \\
- \frac{r_{\text{п}}^{\text{кл}}6\beta_{\text{р,кл}}}{d_{\text{гр}}\rho_{\text{ТВ}}c_{\text{ТВ}}} (P_{\text{п}}^{\text{кл}} - P_{\text{с}}^{\text{кл}}) - \frac{r_{\text{п}}^{\text{в}}6\beta_{\text{р,в}}}{d_{\text{гр}}\rho_{\text{ТВ}}c_{\text{ТВ}}} (P_{\text{п}}^{\text{в}} - P_{\text{с}}^{\text{в}}), \\
\frac{dt_{\text{ТН}}^i}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{ТН.}}}{V_{\text{п}}} (t_{\text{ТН}}^{i-1} - t_{\text{ТН}}^i) - \frac{K_{\text{т}}4s_{\text{а}}\varphi(1-\varepsilon)}{d\sqrt{\varphi(1-\varepsilon)}(s_{\text{вн}} - s_{\text{а}})\rho_{\text{ТН}}c_{\text{ТН}}} (t_{\text{ТН}}^i - t^i)
\end{array} \right. \quad (6)$$

Начальные условия запишутся следующим образом:  $C^i|_{\tau=0} = C_0^i$ ,  $C_{\text{кл}}^i|_{\tau=0} = C_{\text{кл,0}}^i$ ,  
 $C_{\text{в}}^i|_{\tau=0} = C_{\text{в,0}}^i$ ,  $m_{\text{с}}^{\text{кл}i}|_{\tau=0} = 0$ ,  $m_{\text{с}}^{\text{в}i}|_{\tau=0} = 0$ ,  $t^i|_{\tau=0} = t_0^i$ ,  $t_{\text{ТН}}^i|_{\tau=0} = t_{\text{ТН,0}}^i$ .

Исходя из того, что мешалка-ворошитель содержит 70 лопастей, равномерно распределённых по длине вала, компьютерная модель состояла из 70 ячеек ( $i = \overline{1,70}$ ).

Для решения уравнений модели была разработана программа на языке функциональных блочных диаграмм приложения Simulink математического пакета MATLAB, а также проверена её работоспособность.

В работе была проведена параметрическая идентификация модели (3) с целью уточнения константы  $k_2$ . Используются данные экспериментов по исследованию кинетики процесса твёрдофазного дополиамидирования, протекающего 24 часа при рабочей температуре 180 °С. Эксперимент проводился совместно с группой исследователей ИГХТУ. Результаты предварительного статистического анализа эксперимента показали, что данные распределены по нормальному закону и расхождения между дисперсиями измерений в каждой точке случайны. Это позволило в качестве критерия оптимальности оценок констант использовать функционал вида

$$R = \sum_{i=1}^n (C_{\text{кл},i} - \hat{C}_{\text{кл},i})^2, \quad (7)$$

где  $C_{\text{кл},i}$  и  $\hat{C}_{\text{кл},i}$  – экспериментальное и расчётное значения концентрации капролактама.

Для нахождения минимума функционала был использован метод «золотого сечения». Адекватность модели кинетики экспериментальным данным при температуре 180 °С была проверена и подтверждена с использованием критерия Фишера. Рисунок 2 иллюстрирует адекватность модели на качественном уровне.

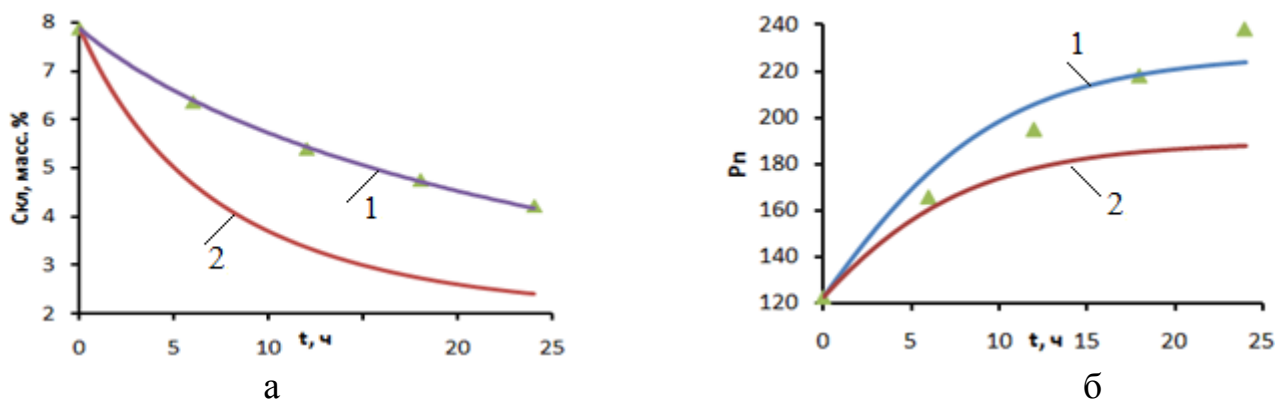


Рисунок 2. Зависимость концентрации капролактама (а) и степени полимеризации (б) от продолжительности процесса дополиамидирования: ▲ - эксперимент; 1 - расчёт с уточнённым значением константы  $k_2$ ; 2 – расчёт с литературными константами

**Третья глава** посвящена системному анализу процесса дополиамидирования как объекта управления. Приведены результаты решения задач редуцирования математической модели, технологической оптимизации процесса, синтеза формализованной модели в форме передаточных функций по каналам регулирования и возмущений.

Ячеечная динамическая модель аппарата содержит 70 ячеек и 490 нелинейных дифференциальных уравнений. Проведение вычислительных экспериментов с использованием такого описания объекта требует значительных вычислительных ресурсов ЭВМ. В этой связи проведена редукция исходной модели аппарата. Для этого была выполнена серия вычислительных экспериментов по моделированию режима пуска аппарата с использованием ячейочной модели различной размерности. Сравнение моделей по точности предсказания концентрации капролактама и температуры позволило сделать вывод, что для целей оптимизации и синтеза системы автоматического управления реактором может быть использована компьютерная модель, состоящая из 5 ячеек.

Согласно регламентным требованиям, гранулы полиамида-6 на выходе из реактора должны иметь температуру  $180 \pm 1^\circ\text{C}$  и содержание капролактама  $2 \div 3$  масс. %. Целью функционирования объекта является обеспечение максимального значения степени превращения капролактама:  $R = (C_{\text{кл,вх}} - C_{\text{кл}}(G, G_{\text{ТН}})) / C_{\text{кл,вх}}$ .

Содержательная формулировка задачи оптимизации реактора-дополимеризатора выглядит следующим образом: при заданных конструктивных параметрах реактора необходимо определить значения расходов гранул  $G$  и теплоносителя  $G_{\text{ТН}}$ , обеспечивающие максимальную степень превращения капролактама при ограничениях на температуру и концентрацию. Математическая формулировка задачи оптимизации имеет вид:

$$\{G, G_{\text{ТН}}\}_{\text{опт}} = \arg \max_{G, G_{\text{ТН}}} R(G, G_{\text{ТН}}). \quad (8)$$

Ограничениями выступают уравнения математической модели статики, а также ограничения на температуру и концентрацию в форме неравенств:

$$\varphi_1 = 179 \leq t \leq 181 \text{ } ^\circ\text{C}, \varphi_2 = C_{\text{кл}} \leq 3 \text{ масс. \%}.$$

В результате решения задачи оптимизации определили, что оптимальными параметрами проведения процесса являются расход гранул 0.208 кг/ч, расход газовой фазы 0.0004 кг/ч, расход теплоносителя 5.5 кг/ч при  $C_{\text{кл,вх}}=6$  масс.%,  $C_{\text{в,вх}}=3$  масс.%,

$P_n=123$ ,  $m_c^{кл,0}=0$  кг/м<sup>3</sup>,  $m_c^{с0}=0$  кг/м<sup>3</sup>,  $t^0=20$  °С,  $t_{ми}^0=190$  °С. При таких величинах концентрация мономера на выходе составляет 2,79 масс.%, температура гранул 180 °С.

Исходя из цели функционирования аппарата, в качестве управляемых переменных были выбраны концентрация мономера в гранулах на выходе и температура гранул. Управляющим воздействием для концентрации капролактама в гранулах предполагается использовать расход твёрдой фазы. Основным возмущающим воздействием для этого параметра является концентрация капролактама в гранулах на входе. Для регулирования температуры гранул предполагается использовать расход теплоносителя. Возмущением для этого параметра является температура поступающего в рубашку теплоносителя.

Реактор твёрдофазного дополиамидирования, с точки зрения теории управления является сложным нелинейным многомерным многосвязным объектом. Решение задачи синтеза алгоритмов управления объектами такого класса весьма затруднительно. Поэтому проведена линеаризация математической модели реактора в окрестности рабочей точки путём перехода к отклонениям регулируемых и входных переменных от статических значений. Для этого используя компьютерную модель реактора, состоящую из 5 ячеек, была получена формализованная модель аппарата в виде передаточных функций по различным каналам. Использовалось приложение System Identification Toolbox математического пакета MATLAB. Передаточные функции объекта по каналам регулирования имеют вид:

$$W_{об}(s) = \frac{\Delta \hat{C}_{кл}}{\Delta \hat{G}} = \frac{7,24}{(12,14s + 1)(12,14s + 1)} = \frac{B_{об}(s)}{A_{об}(s)}, \quad (9)$$

$$W_{об}(s) = \frac{\Delta \hat{t}}{\Delta \hat{G}_{тн}} = \frac{1,8}{(2,2s + 1)(2,2s + 1)} = \frac{B_{об}(s)}{A_{об}(s)}. \quad (10)$$

Для выбранных каналов были определены размерные и безразмерные коэффициенты передачи объекта. Исследование связности объекта позволило сделать вывод о том, что для управления температурой гранул и концентрацией мономера в гранулах возможно использовать систему несвязного регулирования.

**Четвёртая глава** посвящена синтезу и анализу работоспособности различных алгоритмов управления реактором-дополимеризатором.

Задача синтеза системы управления оптимальным режимом работы реактора была сформулирована следующим образом: необходимо синтезировать алгоритмы стабилизации концентрации мономера в грануляте и его температуры на выходе в условиях действия на реактор возмущающих воздействий.

В качестве показателей, характеризующих работу системы автоматического регулирования, были выбраны время регулирования  $\tau_p$ , перерегулирование  $\delta$ , а также погрешность регулирования в статике  $\Delta_{ст}$ . Допустимые значения критериев качества для каждого канала индивидуальны.

В работе предложены три альтернативных варианта структуры системы автоматического регулирования температурой и концентрацией, реализующие различные алгоритмы управления:

1. Безынерционный регулятор состояния, параметрический синтез которого проводится с использованием векторно-матричной модели объекта в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx,$$

где  $u = -Kx$  – управляющее воздействие на объект;  $y$  – выходная переменная объекта;  $x$  – вектор состояния размерности  $(n \times 1)$ ;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы состояния, входа и выхода с размерностями  $(n \times n)$ ,  $(n \times 1)$  и  $(1 \times n)$ , соответственно;  $K$  – вектор-строка коэффициентов

регулятора состояния, в исследуемом случае  $n=2$ . Математическую модель в пространстве состояний получили путём преобразования передаточных функций по соответствующим каналам (9) и (10).

2. Регулятор состояния с интегральной составляющей по выходной переменной:

$$u = -K \cdot x - k_{\text{и}} \int_0^{\tau} y dt.$$

3. Динамический полиномиальный регулятор выходной переменной с передаточной функцией:

$$W_p(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}.$$

Параметрический синтез регуляторов состояния проводился методами теории модального управления. В качестве эталонного характеристического полинома замкнутых систем использовался полином Ньютона, обеспечивающий неколебательный характер переходного процесса управления:

$$H(s) = (s + \omega_0)^n.$$

Среднегеометрический корень  $\omega_0$  вычислялся для заданного времени регулирования  $\tau_p$  по соотношению:  $\omega_0 = \tau_0/\tau_p$ , где  $\tau_0$  – безразмерное время переходного процесса, определенное для стандартной нормированной переходной функции при  $\omega_0=1$ .

Параметры передаточной функции полиномиального регулятора оценивались с использованием основного уравнения синтеза:

$$A_p(s) \cdot S \cdot A_{\text{об}}(s) + B_p(s) \cdot B_{\text{об}}(s) = H(s).$$

Комплексная переменная  $S$  в первом слагаемом означает введение интегратора в структуру регулятора.

Результаты параметрического синтеза алгоритмов регулирования концентрации и температуры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры алгоритмов регулирования

Регулируемая переменная	Регулятор состояния	Регулятор состояния с интегральной составляющей от выходной переменной	Полиномиальный регулятор
Концентрация	$k_1 = 0.66,$ $k_2 = 4.7$	$k_1 = 2.26, k_2 = 8.7,$ $k_{\text{и}} = 0.16$	$a_2 = 2.53, a_1 = 2.6, a_0 = 1.54,$ $b_2 = 6.75, b_1 = 1.97, b_0 = 0.16$
Температура	$k_1 = 2.64,$ $k_2 = 3.42$	$k_1 = 9.03, k_2 = 6.35,$ $k_{\text{и}} = 3.49$	$a_2 = 13.96, a_1 = 79.16, a_0 = 157.77,$ $b_2 = 1089, b_1 = 1417,$ $b_0 = 621.3$

Исследование работоспособности синтезированных алгоритмов заключалось в исследовании свойств инвариантности систем к возмущениям и ковариантности с заданием при сформированных требованиях к точности в статике и динамике, а также к времени регулирования.

На рисунках 3-4 приведены примеры переходных процессов управления при максимально возможных ступенчатых возмущениях. Максимально допустимая погрешность регулирования концентрации в статике  $|\Delta_{\text{ст}}| = 0.05$  масс.%, температуры -  $|\Delta_{\text{ст}}| = 1$  °С.

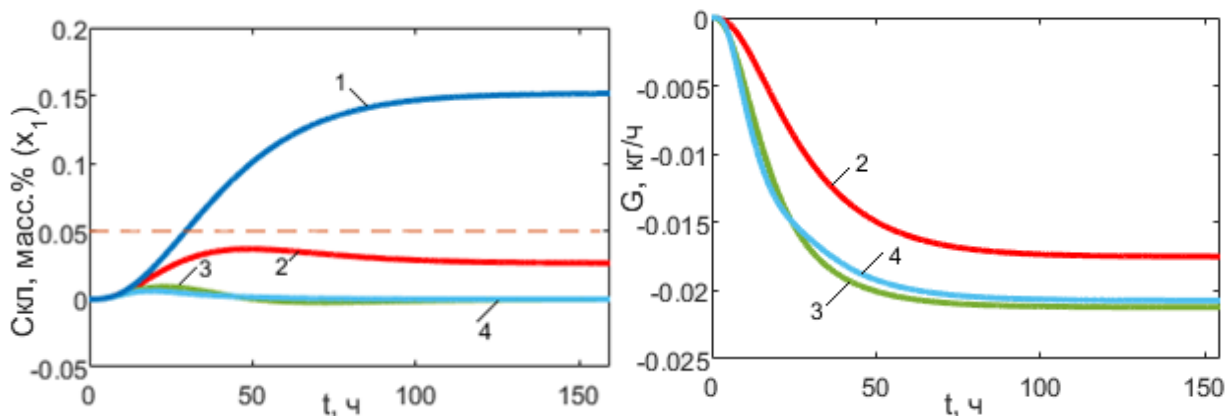


Рисунок 3. Переходные процессы выходной координаты и управления при действии внешнего возмущения  $\Delta C_{\text{кл,вх}} = + 0.5$  масс. %: 1 – объект без регулятора; 2 – замкнутая система с безынерционным алгоритмом; 3 – замкнутая система с астатическим алгоритмом; 4 – замкнутая система с полиномиальным алгоритмом.

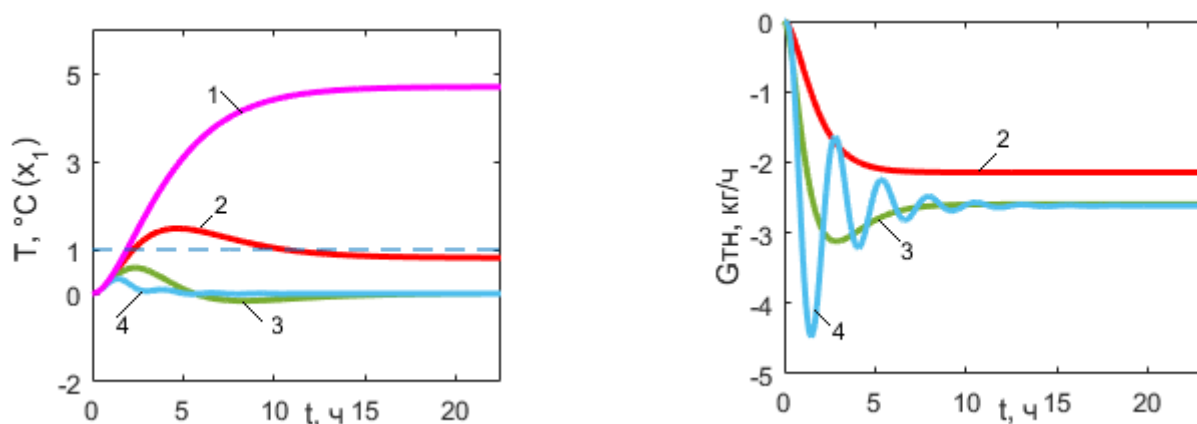


Рисунок 4. Переходные процессы выхода объекта и управления при действии внешнего возмущения  $\Delta t_{\text{тн,вх}} = + 5$  °С: 1 – объект без регулятора; 2 – замкнутая система с безынерционным алгоритмом; 3 – замкнутая система с астатическим алгоритмом; 4 – замкнутая система с полиномиальным алгоритмом

По результатам исследования сформулированы выводы и рекомендации. Для решения задачи стабилизации температуры и концентрации мономера на заданном уровне в условиях действия возмущений необходимо использовать:

- алгоритм на базе динамического полиномиального регулятора для управления температурой;
- алгоритм на базе регулятора состояния с астатической составляющей для управления концентрацией.

### Заключение

1. С использованием методологии системного анализа была разработана математическую модель двухфазного реактора-дополимеризатора, которая отражает явления, происходящие на микроуровне (кинетика химических превращений), на уровне одиночной твёрдой частицы, взаимодействующей с паро-газовой фазой, на уровне элементарного объёма и аппарата в целом. Предложен дискретный вариант модели

динамики реактора-дополимеризатора путём перехода к ячеечной модели с учётом конструктивных особенностей реактора.

2. Выполнена параметрическая идентификация модели кинетики химической реакции полимеризации капролактама в гранулах полимера с использованием экспериментальных данных по «глубокому» превращению мономера при температуре 180 °С. В результате была уточнена оценка предъэкспоненциального множителя константы скорости стадии дополиамидирования.

3. Поставлена и решена задача определения оптимальных значений нагрузки на аппарат по твёрдой фазе и расхода теплоносителя, которые обеспечивают максимальную степень превращения капролактама и заданное значение температуры твёрдых частиц на выходе из реактора.

4. Проведена редукция исходной математической модели объекта – определено минимальное число ячеек модели, адекватно описывающих динамику реактора-дополимеризатора. Разработана формализованная модель динамики реактора в форме передаточных функций по различным каналам.

5. Предложены три альтернативных алгоритма управления концентрацией мономера в гранулах полимера и температурой гранул на выходе из реактора. Проведён параметрический синтез алгоритмов управления исходя из требований к показателям качества и характеру переходного процесса управления.

6. Разработаны программные средства решения задач системного анализа реактора-дополимеризатора и системы управления процессом:

- программное средство для решения задачи технологической оптимизации;
- программа решения задачи параметрической идентификации модели кинетики при заданной температуре гранул;
- программное средство для реализации вычислительного эксперимента при имитационном моделировании комплекса «реактор – управляющая подсистема».

7. Методами вычислительного эксперимента исследована работоспособность и эффективность функционирования комплекса «реактор твердофазного дополиамидирования – подсистема управления». Показано, что для решения задачи стабилизации температуры и концентрации мономера на заданном уровне в условиях действия возмущений необходимо использовать:

- алгоритм на базе полиномиального динамического регулятора для управления температурой;
- алгоритм управления состоянием с астатической составляющей для управления концентрацией.

### **Публикации по теме диссертации**

#### Публикации в журналах из перечня рецензируемых научных изданий

1. Алексеев, Е.А. Моделирование процесса получения полиамида-6 / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин, Е.В. Ерофеева // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2015. – Т.58. – Вып. 1. – С. 65-68.

2. Алексеев, Е.А. Имитационное моделирование стадии синтеза поликапроамида для управления процессом его промышленного получения / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин, Е.В. Ерофеева // Изв. вузов. Экономика, финансы и управление производством. – 2014. – Т.22. – Вып. 4. – С. 108-112.

3. Алексеев, Е.А. Оценка общесистемных и структурных свойств реактора-дополимеризатора как объекта управления / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н.

Лабутин, Е.В. Ерофеева // Изв. вузов. Экономика, финансы и управление производством. – 2015. – Т.24. – Вып. 2. – С. 182-184.

#### Регистрация интеллектуальной собственности

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019663488 Российская Федерация. Определение оптимальных режимных параметров реактора-дополимеризатора / Алексеев Е.А., Лабутин А.Н.; заявитель и обладатель ФГБОУ ВО ИГХТУ (RU). - № 2019662347; заявл. 09.10.2019; опублик. 17.10.2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 С.

#### Публикация в прочих изданиях

5. Алексеев, Е.А. Имитационное моделирование процесса синтеза поликапроамида / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин // Тезисы докладов VIII Международная научная конференция «Кинетика и механизм кристаллизации. Кристаллизация как форма самоорганизации вещества», Иваново, 2014: – И.: Изд-во «Иваново». – 2014. – С. 173-174.

6. Алексеев, Е.А. Имитационное моделирование стадии процесса получения поликапроамида / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин, Е.В. Ерофеева // Сборник трудов XI-го Международного научно-технического симпозиума «Теоретические и экспериментальные основы создания энерго- и ресурсосберегающих процессов и оборудования» (ЭРПО-2014) посвященного 85-летию академика РАН А.М. Кутепова. – Иваново: ФГБОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун.-т., 2014. – С. 415-420.

7. Alekseev, E.A. Investigation of polycaproamide process production as control object. / E.A. Alekseev, B.A. Golovushkin, A.N. Labutin // 21-st International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2014 Prague: CD-ROM of Full Texts, P5.113.

8. Алексеев, Е.А. «Управление процессом синтеза полиамида-6» / Алексеев Е.А., Головушкин Б.А., Лабутин А.Н., Ерофеева Е.В. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. - №. 6(65). – С. 33.

9. Алексеев, Е.А. «Исследование стадии дополиамидирования процесса синтеза полиамида-6 как объекта управления» / Алексеев Е.А., Головушкин Б.А., Лабутин А.Н., Ерофеева Е.В. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2015. - № 6(76) – С. 137-139.

10. Алексеев, Е.А. «Имитационное моделирование стадии синтеза полиамида-6» / Алексеев Е.А., Головушкин Б.А., Лабутин А.Н. // Тезисы докладов Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) и школа молодых учёных «Получение и модифицирование синтетических волокон и нитей для инновационных материалов, композитов и изделий» («Волокна и композиты - 2015»), Плётс, Ивановская область, 2015. – И.: Изд-во «Иваново». – 2015. – С. 24.

11. Alekseev, E.A. Study of system-wide and structural properties of the pre-polyamidation tank / E.A. Alekseev, B.A. Golovushkin, A.N. Labutin // 22nd International congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2016.: CD-ROM of Full Texts, P5.26.

12. Алексеев, Е.А. Алгоритмический синтез системы оптимального управления реактором в производстве полиамида-6 / Алексеев Е.А., Головушкин Б.А., Лабутин А.Н., Ерофеева Е.В. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016. – №. 4(86). – С. 94-96.

13. Алексеев, Е.А. Компьютерное моделирование управления процессом получения полиамида-6 / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин // Тезисы докладов «IX Международная научная конференция «Кинетика и механизм кристаллизации.



- Кристаллизация и материалы будущего», Иваново, 2016. – И.: Изд-во «Ивановский издательский дом». – 2016. – С. 92.
14. Alekseev, E.A. Study of system-wide and structural properties and optimal control of the pre-polyamidation tank / E.A. Alekseev, B.A. Golovushkin, A.N. Labutin, E.V. Erofeeva // Technical Transactions. Mechanics. – 2016. – Iss. 2-M. – pp. 13-20.
15. Алексеев, Е.А. Синтез алгоритмов управления процессом дополиамидирования полиамида-6 / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин // Тезисы докладов «XI Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем» (Крестовские чтения), Иваново, 2017. – И.: Изд-во «Ивановский издательский дом». – 2017. – С. 134-135.
16. Алексеев, Е.А. Структурная и параметрическая идентификация динамических каналов реактора-дополимеризатора / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин // Кластер конференций 2018, Суздаль, 2018: Тезисы докладов. – И.: Изд-во «Ивановский издательский дом». – 2018. – С. 306-307.
17. Алексеев, Е.А. Идентификация динамических каналов реактора-дополимеризатора для синтеза полиамида-6 / Е.А. Алексеев // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – №1-2. – С. 126-128.
18. Алексеев, Е.А. Исследование структурных и параметрических свойств реактора-дополимеризатора / Е.А. Алексеев, Б.А. Головушкин, А.Н. Лабутин // Сборник трудов «XIII Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование», Иваново, 2018. – И.: Изд-во «ИГХТУ». – 2018. С. 85-86.
19. Alekseev, E.A. Synthesis of control algorithms of prepolyamidation polyamide-6 process / E.A. Alekseev, B.A. Golovushkin, A.N. Labutin // 23rd International congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2018 Prague.: CD-ROM of Full Texts, P5.36.
20. Алексеев, Е.А. Разработка алгоритмов управления реактором при синтезе полиамида-6 / Е.А. Алексеев // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2019. – №1-2. – С. 239-241.
21. Алексеев, Е.А. Алгоритм управления концентрацией мономера в реакторе твёрдофазного дополиамидирования / Алексеев Е.А., Головушкин Б.А., Лабутин А.Н. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2019 – Т.12-2. – С. 73-76.