

На правах рукописи



Боровков Владимир Андреевич

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ
ХИМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В МИКРОРЕАКТОРЕ В УСЛОВИЯХ
СТИМУЛИРОВАННОЙ СВЧ-НАГРЕВОМ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Научный руководитель	доктор технических наук, доцент Марков Андрей Викторович
Научный консультант	доктор технических наук, профессор Юленец Юрий Павлович
Официальные оппоненты:	Гордиенко Мария Геннадьевна , доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», профессор Литовка Юрий Владимирович , доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», профессор
Ведущая организация	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования « Казанский национальный исследовательский технологический университет »

Защита состоится 15 июня 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.383.05, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Белоколонный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), <https://technolog.edu.ru/filecat/454>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Ученый совет, e-mail: dissowet@technolog.edu.ru

Автореферат разослан 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Клементьев Василий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Эффективным аппаратным оформлением ряда химических и биохимических процессов, а также процессов приготовления лекарственных веществ являются микрореакторы – миниатюрные технологические устройства для проведения химических процессов, как правило, одновременно в нескольких параллельных каналах. Основное преимущество микрореакторов заключается в несравненно более высоком, чем у стандартных реакторов, соотношении поверхность-объем, достигающем значений $10000 - 50000 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Микрореакторная техника позволяет создавать интегрированные химические системы, комбинировать отдельные базовые устройства – смесители, теплообменники, сепараторы.

Однако, на практике преимущества микрореакторов используются не в полной мере. Незученным приемом интенсификации процессов в микрореакторах является создание нестандартных режимов движения жидкостей. Речь идёт о конвективном течении Марангони, возникающем в жидких средах вблизи поверхности раздела фаз под действием тангенциальных капиллярных сил при неоднородности поверхностного натяжения. В химических аппаратах стандартных размеров термокапиллярная конвекция затухает существенно более значительными по интенсивности гравитационными конвективными течениями. Режимы работы микрореакторов – ламинарное движение потоков в узких горизонтальных слоях – вполне соответствуют условиям, при которых термокапиллярная конвекция способна оказать существенное влияние на интенсивность химических и тепломассообменных процессов. Сказанное определяет актуальность темы исследования.

В настоящей работе для интенсификации химического процесса в микрореакторе впервые предложено применить неравномерный (с помощью СВЧ-воздействия) нагрев двухфазной системы жидкость – жидкость, инициирующий развитие термокапиллярной конвекции. Неравномерный (по длине аппарата) СВЧ-нагрев реакционной смеси способствует развитию дополнительной движущей силы термокапиллярной конвекции. Одновременно СВЧ-нагрев как безынерционный источник тепла формирует предпосылки для эффективного управления объектом. Методы создания автоматизированных систем управления технологическими процессами в микрореакторах – объектах нового типа, реализующих механизм термокапиллярной конвекции, ранее не исследовались.

Степень разработанности темы исследования

Механизм интенсифицирующего действия неравномерного нагрева на химические процессы в микрореакторах ранее не исследовали. Не разработана и методология изучения химических и массообменных процессов в микрореакторах с дополнительным источником тепла, используемым для создания термокапиллярного движения.

СВЧ-нагрев реакционной смеси в лучевой СВЧ-камере переводит микрореактор, ранее трудно управляемый объект, в категорию управляемых.

Теоретические основы и методы построения автоматизированных систем управления химическими процессами в микрореакторах при дополнительном СВЧ-нагреве не разработаны. Разрабатываемая АСУ должна соответствовать современной концепции создания автоматизированных цифровых производств и, в частности, содержать в своем составе устройства интеллектуальной поддержки процесса управления.

Цели и задачи работы

Цель исследования: разработка эффективного, основанного на неравномерном нагреве компонентов, химического процесса в микрореакторе; разработка методологических основ построения автоматизированной системы управления химическим процессом в микрореакторе (сети микрореакторов) – объекте нового типа, реализующем механизм термокапиллярной конвекции.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка эффективного, использующего неравномерный СВЧ-нагрев компонентов реакции для развития термокапиллярной конвекции, химического процесса в микрореакторе на примере переэтерификации подсолнечного масла этанолом;
- разработка математической модели и методики расчета микрореактора при дополнительном СВЧ-нагреве;
- оптимизация химического процесса в микрореакторе изменением количественного отношения компонентов реакции;
- разработка самонастраивающейся, с обучающейся моделью, системы автоматического управления химическим процессом в микрореакторе при дополнительном СВЧ-нагреве;
- разработка автоматизированной системы управления химическим процессом в микрореакторе (сети микрореакторов), использующей принцип интеллектуальной поддержки процесса управления.

Научная новизна работы

Разработан и теоретически обоснован способ интенсификации химических процессов в микрореакторе путем неравномерного нагрева реакционной смеси в лучевой СВЧ-камере.

На примере химического процесса переэтерификации подсолнечного масла этанолом показано, что СВЧ-воздействие на реакционную смесь приводит к развитию продольного (по длине аппарата) градиента температур и к интенсивному вихревому движению на поверхности раздела фаз.

Разработаны математическая модель и методика расчета микрореактора при СВЧ-нагреве. Математическая модель описывает распределение концентрации и распределение температуры целевого компонента по длине микрореактора и учитывает влияние на его интенсивность количественного отношения компонентов реакции и стимулированного СВЧ-воздействием эффекта термокапиллярной конвекции.

Предложенный способ интенсификации химических процессов в микрореакторах, реализуемый с использованием безынерционного источника тепла, формирует предпосылки эффективного управления и автоматизации объектов этого типа.

Изучены динамические характеристики микрореактора с дополнительным внутренним источником тепла по каналам управления и возмущения – объекта с распределенными параметрами нового типа, реализующего механизм термокапиллярной конвекции.

Разработана автоматизированная система управления химическим процессом в параллельно функционирующих микрореакторах – интеллектуальная система с обучающейся моделью в канале управления, обеспечивающая компенсацию неконтролируемых возмущений, в том числе при изменяющихся динамических характеристиках объекта. Система использует принцип интеллектуальной поддержки процесса управления: встроенная в микроконтроллер расчетная процедура реализует алгоритм обучения модели изменяющимся в динамике характеристикам объекта путем самонастройки параметров (коэффициентов) модели на основе анализа переходных процессов в объекте и в модели.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическую значимость работы представляют: математические модели статики и динамики химического процесса в микрореакторе, учитывающие влияние на его интенсивность термокапиллярной конвекции; постановка и решение задачи управления сложным химико-технологическим объектом, использующим физический метод воздействия на компоненты реакции; численная оценка скоростей термокапиллярного движения на межфазной границе жидкость-жидкость при переменном по длине аппарата градиенте температур; включенная в состав АСУ самонастраивающаяся система с обучающейся моделью, обеспечивающая высокое качество управления, в том числе при изменяющихся динамических свойствах объекта.

Практическая значимость работы: методика расчета химического процесса в микрореакторе при СВЧ-нагреве; программный комплекс и электронные ресурсы для исследования статических и динамических характеристик микрореактора в условиях стимулированной СВЧ-воздействием термокапиллярной конвекции; алгоритм обучения и самонастройки модели под изменяющиеся динамические свойства объекта управления; структурные схемы автоматической и автоматизированной систем управления микрореактором при СВЧ-нагреве.

Методология и методы исследования

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют работы отечественных и зарубежных ученых в области химической технологии, физики и механики сплошных сред, теории управления.

При выполнении работы использовались методы математического моделирования и оптимизации химико-технологических процессов, исследования динамики объектов с сосредоточенными и распределенными параметрами, аналитического и численного решения дифференциальных уравнений, синтеза автоматизированных систем управления, а также компьютерные программы MathCad, MATLAB, Simulink, Python 3. Экспериментальные исследования выполнены с использованием лабораторной СВЧ-камеры закрытого типа с генератором мощностью 0,75 кВт, работающим на стандартной частоте 2450 МГц, и регулируемым выпрямителем.

Лабораторное оборудование составляли: модель одноканального микрореактора из фторопласта, микрореактор фирмы Little Things Factory LTF-V со смесителем LTF-MX, микронасосы NE-1000 компании New Era Instruments.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ проведения химического процесса в микрореакторе, использующий неравномерный по длине аппарата нагрев реакционной смеси в лучевой СВЧ-камере, обеспечивающий интенсификацию химического процесса в 2,0–2,6 раза, и механизм протекания процесса в условиях дополнительной движущей силы термокапиллярной конвекции.

2. Математические модели статики и динамики химического процесса переэтерификации подсолнечного масла этанолом в микрореакторе, описывающие распределения концентрации и температуры по длине аппарата и учитывающие влияние на его интенсивность количественного отношения компонентов реакции и стимулированной СВЧ-воздействием термокапиллярной конвекции.

Методика расчета микрореактора при дополнительном СВЧ-нагреве.

3. Динамические характеристики микрореактора с внутренним источником тепла (объекта нового типа, реализующего механизм термокапиллярной конвекции) по каналам управления и возмущения.

4. Автоматизированная система управления химическим процессом в параллельно функционирующих микрореакторах – интеллектуальная система с обучающейся моделью в канале управления, обеспечивающая компенсацию неконтролируемых возмущений. Алгоритм обучения модели изменяющимся в динамике характеристикам объекта.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы подтверждается корректным использованием методов математического моделирования и оптимизации химико-технологических процессов, аналитического и численного решения дифференциальных уравнений, синтеза автоматизированных систем, алгоритмов интеллектуализации при построении АСУ, обработкой полученных экспериментальных данных и их интерпретацией путем сопоставления с известными из литературы результатами исследований, а также результатами практического использования (внедрения).

Результаты работы прошли апробацию на двух международных и одной российской научных конференциях: Международная конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий», Тула, 2019; Российская конференция «Неделя науки-2019», Санкт-Петербург, 2019; XXXIII международная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-33», Санкт-Петербург, 2020.

По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 2 статьи в рецензируемом научном журнале, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, 5 докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 143 страницах, состоит из пяти глав, содержит 20 рисунков, 16 таблиц, трёх приложений, список использованных источников насчитывает 134 наименования.

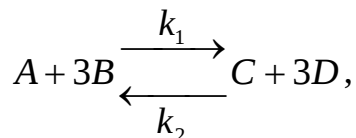
Содержание работы

Во **Введении** сформулирована научная проблема исследования, выделена актуальность работы, приведены положения научной новизны, теоретической и практической значимости результатов работы, обоснована степень разработанности проблемы.

В **главе 1** дан критический анализ состояния вопроса в области интенсификации химических процессов в классических реакторах и в микрореакторах, а также исследований в области автоматического управления реакторами. Отмечено, что наряду с известными приемами ослабления тормозящей роли массопереноса на химические реакции большими возможностями обладает ранее не использовавшийся способ воздействия на химические процессы, основанный на эффекте Марангони. Системы управления сложными химико-технологическими объектами часто заменяются системами поддержки принятия решений или экспертными системами, осуществляющими прогнозирование режимов работы установки на основе анализа прошлых ситуаций. В результате глобальная цель управления – поддержание оптимального или наиболее рационального режима объекта в условиях действующих возмущений (изменяющейся производственной ситуации) остается недостигнутой. Перспективным подходом к цифровизации управления является применение в составе разрабатываемых АСУ элементов интеллектуализации.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В МИКРОРЕАКТОРЕ

Примером исследования выбран химический процесс переэтерификации подсолнечного масла этанолом. Схема химических превращений имеет вид



где A – подсолнечное масло, B – этиловый спирт, C – глицерин (побочный продукт), D – этиловые эфиры жирных кислот (биодизельное топливо).

Уравнение скорости реакции имеет вид

$$r = \frac{dc_A}{d\tau} = -k_1'c_A + k_2'c_D, \quad (1)$$

где c_A , c_D – объемные концентрации компонентов A и D в смеси соответственно A и B и C и D , кмоль/м³; τ – время, с; k_1' , k_2' – эффективные (учитывающие вклад массопередачи) константы скорости прямой и обратной реакций, 1/с:

$$\frac{1}{k'} = \frac{1}{k} + \frac{1}{\eta'}. \quad (2)$$

Здесь k – константа скорости химической реакции: $k = z \exp(-E/RT)$, 1/с; z – предэкспоненциальный множитель уравнения Аррениуса, 1/с; E – энергия активации химического превращения, кДж/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; η' – объемный коэффициент массопередачи: $\eta' = \eta A_v$, 1/с; η – коэффициент массоотдачи, м/с; A_v – удельная поверхность раздела фаз, м²/м³.

Уравнение (1) записано для ключевого компонента реакции. Остальные (неключевые) компоненты связаны с компонентом A выражениями

$$c_B = 3(c_A - c_{AH}) + c_{BH}, \quad c_C = -(c_A - c_{AH}) + c_{CH}, \quad c_D = 3(c_{AH} - c_A) + c_{DH}. \quad (3)$$

Здесь c_A, c_B, c_C, c_D – объемные концентрации реагентов в соответствующей смеси, кмоль/м³; $c_{AH}, c_{BH}, c_{CH}, c_{DH}$ – начальные концентрации реагентов, кмоль/м³.

Учитывая (3), а также начальные значения концентраций $c_A|_{\tau=0} = c_{AH}$, $c_B|_{\tau=0} = c_{BH}, c_C|_{\tau=0} = c_{CH} = c_D|_{\tau=0} = c_{DH} = 0$, вместо уравнения (1) можно записать:

$$\frac{dc_A}{d\tau} = -(k_1' + 3k_2')c_A + 3k_2'c_{AH}. \quad (4)$$

При равновесии ($\tau = \infty$): $r = 0$, $c_A = c_A^* = c_{Amin}$, откуда

$$k_2' = \frac{1}{3} \cdot \frac{k_1' c_A^*}{c_{AH} - c_A^*}, \quad (5)$$

где c_A^* – равновесная концентрация компонента A в смеси A и B :

$c_A^* = \left(c_{AH} - \frac{1}{3} c_{Dmax} \right)$, кмоль/м³; c_{Dmax} – максимальное достигнутое в эксперименте значение концентрации целевого продукта, кмоль/м³.

Характеристическое уравнение для обратимой реакции в аппарате идеального вытеснения получается из уравнения (4) при $c_A|_{\tau=0} = c_{AH}$:

$$c_A(\tau) = \frac{c_{AH}}{k_1' + 3k_2'} \{ 3k_2' + k_1' \exp[-(k_1' + 3k_2')\tau] \}, \quad (6)$$

где $\tau = l/v$ – время пребывания реакционной смеси в аппарате, с; v – приведенная линейная скорость двухфазного потока, м/с; l – текущая длина микрореактора, м.

Зависимость начальной концентрации масла в смеси этанол – масло от мольного отношения компонентов ϕ ($\phi = B/A$, кмоль B на кмоль A) получена в виде

$$c_{AH}(\phi) = \frac{1}{\frac{M_A}{\rho_A} + \frac{\phi M_B}{\rho_B}}, \quad (7)$$

где M_A, M_B – молекулярный вес компонента, кг/кмоль; ρ_A, ρ_B – плотность компонента, кг/м³.

Зависимости $k_1'(\phi)$ и $k_2'(\phi)$ найдены путем обработки экспериментальных данных процесса этанолиза в микрореакторе ($d_{внутр} = 500$ мкм, $L = 2,1$ м, $T_{вх} = 65^\circ\text{C}$, катализатор КОН (1 % вес.)) и аппроксимированы выражениями:

$$k_1'(\varphi) = a_0 + a_1 \ln \varphi; \quad k_2'(\varphi) = \begin{cases} b_0 + b_1 \varphi + b_2 \varphi^2, & 3 \leq \varphi \leq 6 \\ b_3 + b_4 \ln \varphi, & \varphi = 6 \div 45,4. \end{cases}$$

Для оценки эффективности проведения процесса этанолиза при переменных значениях параметра φ выражение (6) трансформировалось к виду

$$c_D(\tau) = 3c_{\text{АН}}(\varphi) \left\{ 1 - \frac{1}{k_1' + 3k_2'} \cdot [3k_2' + k_1' \exp\{-(k_1' + 3k_2')\tau\}] \right\}. \quad (8)$$

На рисунке 1 в качестве примера построена зависимость концентрации c_D от времени пребывания в аппарате при $\varphi = \text{var}$.

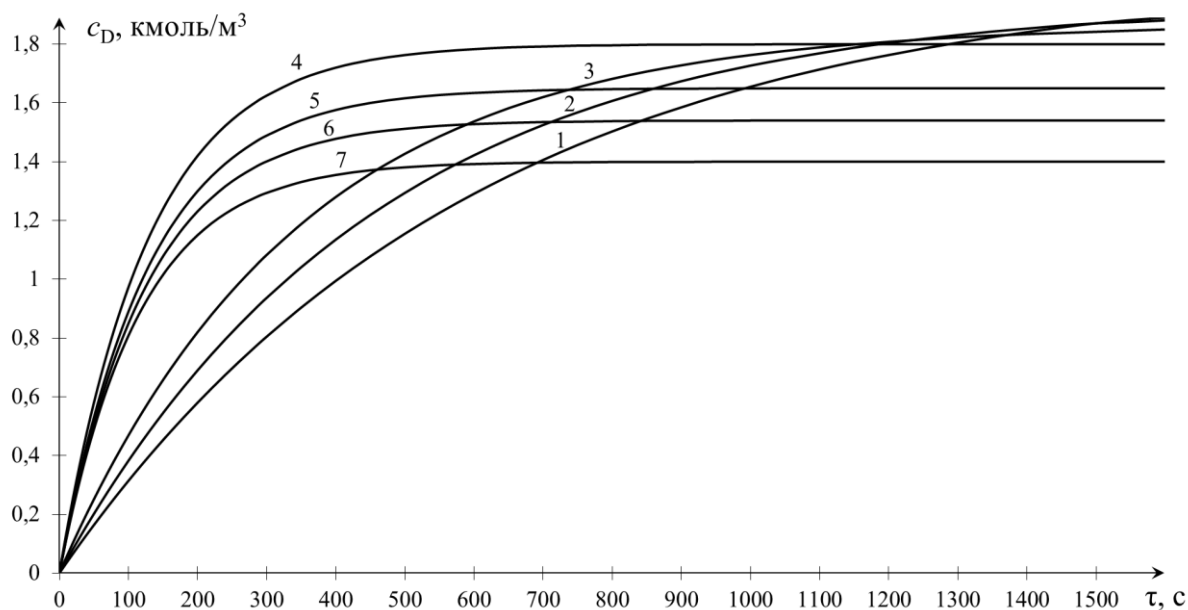


Рисунок 1 – Зависимости концентрации $c_D(\tau)$ при $\varphi = \text{var}$ ($v = 2,1$ мм/с, $T = 65$ °C):
1) $\varphi = 3$; 2) $\varphi = 4$; 3) $\varphi = 5$; 4) $\varphi = 6$; 5) $\varphi = 9$; 6) $\varphi = 12$; 7) $\varphi = 16,2$

Наиболее интенсивным оказался режим 4, хотя по стехиометрии наилучшим должен быть режим 1 ($\varphi = 3$), так как каждая молекула масла производит 3 молекулы этилового эфира.

На рисунке 2 построена зависимость относительной производительности микрореактора $\tilde{L}$ от параметра φ :

$$\tilde{L}(\varphi) = \frac{G}{G_0} = \frac{c_D(\varphi)\tau_{\text{НОМ}}}{c_{D\text{НОМ}}\tau(\varphi)}, \quad (9)$$

где G , G_0 – производительность и номинальная производительность микрореактора, соответствующая загрузке компонентов в стехиометрическом соотношении ($\varphi = 3$), при котором $\tau = \tau_{\text{НОМ}}$, $c_D = c_{D\text{НОМ}}$: $G(\varphi) = \frac{c_D(\varphi)M_D V}{\tau(\varphi)}$,

M_D – молекулярный вес этилового эфира, кг/кмоль; V – объем аппарата, м³.

В интервале значений $\varphi = 3 \div 5$ тормозящее влияние на химическую реакцию оказывает массоперенос. При $\varphi = 6 \div 9$ производительность микрореактора резко возрастает. Избыточное содержание этанола в смеси способствует увеличению удельной поверхности раздела фаз A_v . В результате

коэффициент η' возрастает, а вклад массопереноса в химическую реакцию ослабевает. Однако величина A_v – трудно определяемый параметр.

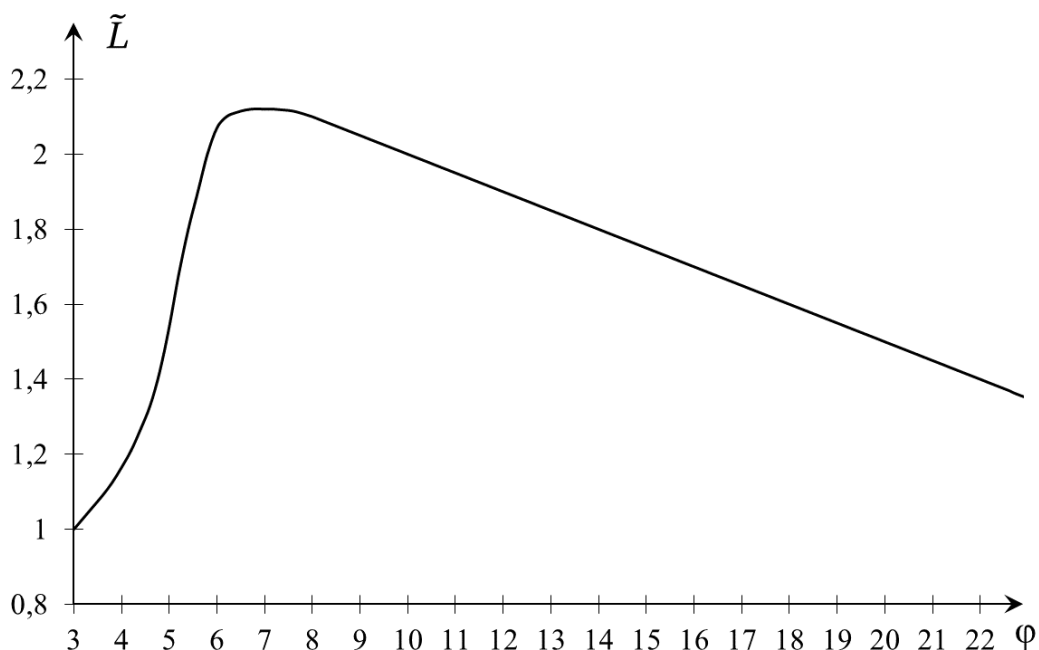


Рисунок 2 – Зависимость относительной производительности микрореактора от мольного отношения компонентов ($v = 2,1$ мм/с, $T = 65$ °С). При $\frac{\partial \tilde{L}}{\partial \phi} = 0$ $\phi_{\text{опт}} = 6,7$

Глава 3. НЕРАВНОМЕРНЫЙ НАГРЕВ КОМПОНЕНТОВ КАК СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В МИКРОРЕАКТОРЕ

Механизм интенсифицирующего действия избытка этанола в смеси на процесс этанолиза интерпретирован следующим образом.

При увеличении параметра ϕ межфазное поверхностное натяжение σ_{AB} уменьшается из-за преобладания в нем доли жидкости с меньшим поверхностным натяжением ($\sigma_A = 33$ мДж/м², $\sigma_B = 22,8$ мДж/м²). В результате увеличивается способность этанола смачивать частицы масла, и, как следствие, увеличивается величина A_v . Избыток спирта в смеси проявляет себя как своего рода ПАВ по отношению к маслу. Дальнейшей интенсификации процесса можно было бы добиться традиционным способом – путем применения ПАВ. Однако в рассматриваемом случае применение каких-либо ПАВ недопустимо из-за неизбежного образования в этиловых эфирах продуктов омыления.

В диссертации предложен электрофизический (ЭФ) способ воздействия на поверхностные свойства жидкостей. ЭФ-свойства компонентов реакции этанолиза позволяют с помощью СВЧ-воздействия осуществить избирательный и неравномерный по длине аппарата нагрев смеси (в ЭМ-поле нагревается только этиловый спирт – полярная жидкость с большими диэлектрическими потерями: $\epsilon' = 8,1$, $\text{tg} \delta = 0,25$ при $f = 2450$ МГц). Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.

СВЧ-нагрев смеси позволяет сформировать продольный градиент температуры на границе раздела фаз. При расчете изменения температуры по длине аппарата рассматривалась смесь из всех четырех компонентов.

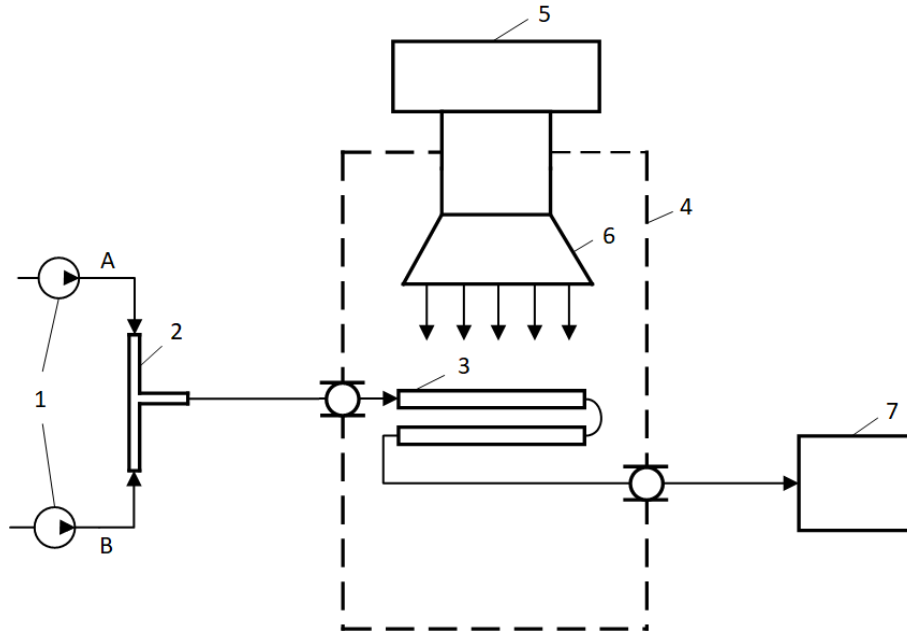


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки для исследования процесса перегретерификации при СВЧ-нагреве:

- 1) насосы, 2) Т-образный смеситель, 3) микрореактор, 4) технологическое устройство, 5) СВЧ-генератор, 6) рупорная антенна (излучатель), 7) сборник

Конвективный перенос тепла в движущемся слое в установившемся режиме работы микрореактора описывается уравнением

$$v \frac{dT}{dl} = \frac{p c_{BV}(l)}{\rho_{cm}(c_A) C_{cm}(c_A)}, \quad T|_{l=0} = T_{BX}, \quad 0 \leq l \leq L, \quad (10)$$

где T – температура реакционной смеси, К, °С; T_{BX} – температура смеси на входе в микрореактор, К, °С; L – длина микрореактора, м; p – удельная мощность внутренних источников тепла, Вт/м³; ρ_{cm} – плотность смеси, кг/м³; C_{cm} – теплоемкость смеси, Дж/(кг·К); c_{BV} – объемная доля этанола в смеси, м³/м³, равная

$$c_{BV}(l) = \frac{3c_A(l)M_B}{\rho_B}. \quad (11)$$

Здесь ρ_B – плотность этанола, кг/м³.

Выделяющаяся в этаноле в виде тепла удельная мощность p определяется через поток p_0 падающей при СВЧ-облучении мощности, Вт/м²

$$p = 2\alpha p_0(1 - \gamma), \quad (12)$$

где α , γ – соответственно коэффициенты затухания, 1/м, и отражения ЭМ-волны:

$$\alpha = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon'}{2}} \operatorname{tg} \delta \left[1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \right]^{-1/2}, \quad \gamma = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} \right|^2,$$

где $k_0 = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ – волновое число для вакуума, 1/м; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость

вакуума, $\Phi/\text{м}$; ε' , $\text{tg}\delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь среды; $\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'\text{tg}\delta$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

Зависимость концентрации c_A от текущей длины микрореактора получается из решения уравнения (4), учитывая что $l = v\tau$ и $d\tau = dl/v$:

$$c_A(l) = \frac{c_{AH}}{k_1' + 3k_2'} \left\{ 3k_2' + k_1' \exp \left[-\frac{(k_1' + 3k_2')l}{v} \right] \right\}. \quad (13)$$

На рисунке 4 построена зависимость градиента температуры реакционной смеси от текущей длины микрореактора, полученная численным решением уравнения (10) с подстановкой (13).

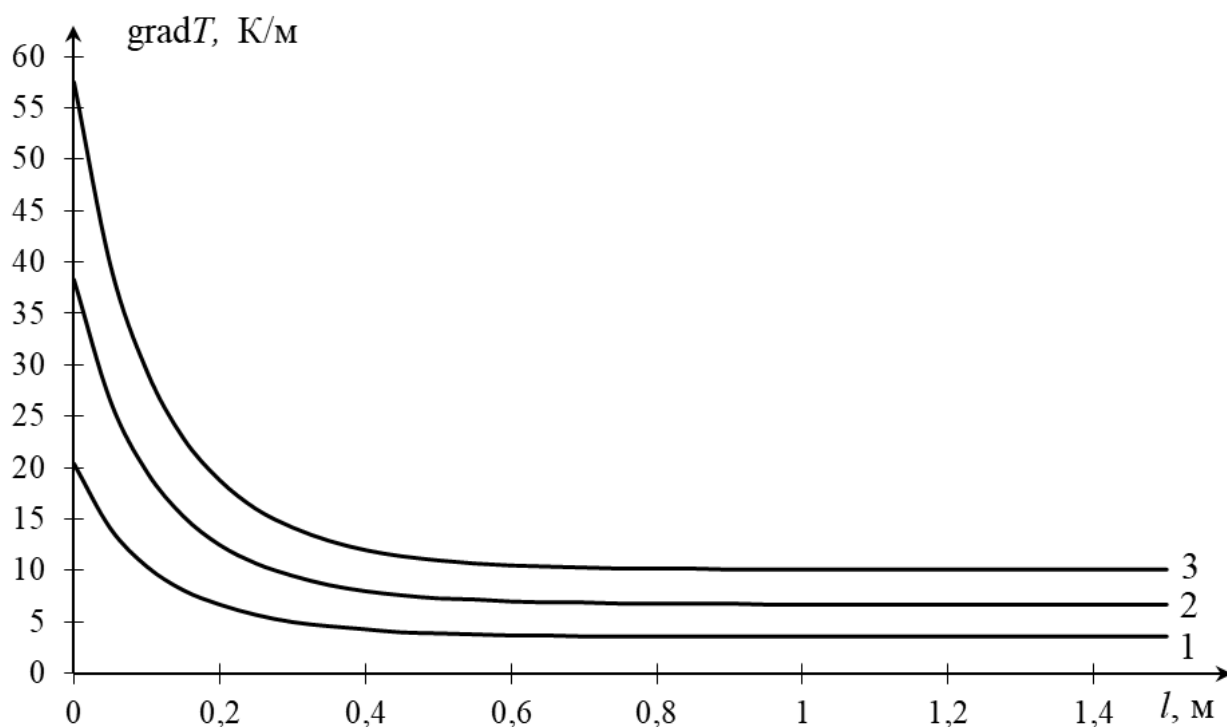


Рисунок 4 – Изменение градиента температуры реакционной смеси по длине микрореактора в условиях стимулированной СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции ($v = 2,1$ мм/с):

- 1) $T_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$, $p = 0,47$ МВт/м³; 2) $T_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$, $p = 0,88$ МВт/м³; 3) $T_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$, $p = 1,32$ МВт/м³

В отличие от температуры, температурный градиент уменьшается по длине аппарата. В наиболее интенсивном режиме – режиме 3 (рисунок 4), температурный градиент оказывается весьма значительным: $\text{grad}T = 15\text{--}55$ К/м.

Применение СВЧ-нагрева резко ускоряет химический процесс – рисунок 5. Наибольшая его интенсивность наблюдается в режиме 4 при максимальном температурном градиенте.

Система уравнений, описывающих движение жидкостей под действием стимулированного неравномерным СВЧ-нагревом продольного градиента температуры (подсолнечное масло движется цилиндрической струйкой по оси канала, этиловый спирт – в кольцевом пространстве между маслом и стенкой канала – рисунок 6; течение осесимметричное) имеет вид:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial F}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right), \quad (17)$$

где z – продольная координата, м; x, y – координаты плоскости, перпендикулярной оси z , м; v_z – скорость термокапиллярного движения в горизонтальном направлении, м/с; F – давление, Па; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; f_σ – напряжение тангенциальной силы, возникающей при изменении поверхностного натяжения жидкостей на границе раздела, Н/м²:

$$f_\sigma = \frac{d\sigma_{AB}}{dz} = \frac{d\sigma_{AB}}{dT} \frac{dT}{dz}. \quad (18)$$

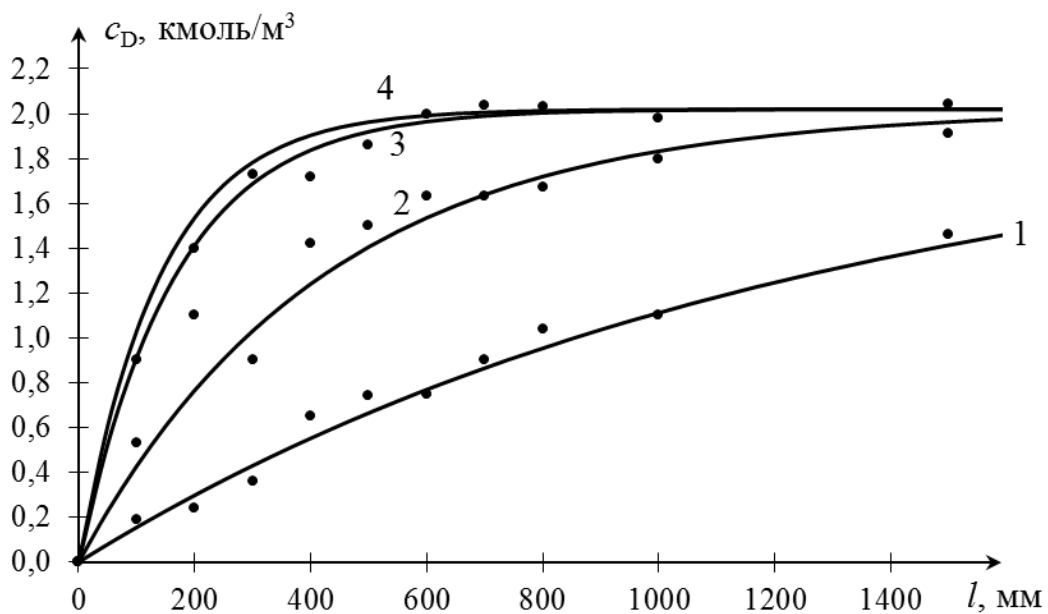


Рисунок 5 – Зависимости выходной концентрации c_D от текущей длины микрореактора ($v = 2,1$ мм/с): 1) $T_{\text{вх}} = 65^\circ\text{C}$ без дополнительного СВЧ-нагрева; 2) $T_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$, $p = 0,47$ МВт/м³; 3) $T_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$, $p = 1,15$ МВт/м³; 4) $T_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$, $p = 1,32$ МВт/м³. Точками отмечены экспериментальные данные



Рисунок 6 – Фотография потоков в микроканале
 i – подсолнечное масло, e – этанол

Из уравнений (14)–(16) следует, что скорость v_z не зависит от координаты z , а давление F не зависит от координат x и y .

В цилиндрической системе координат уравнение (17) записывается в виде

$$\frac{\partial F}{\partial z} = \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right), \quad (19)$$

с граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} = -f_\sigma \quad \text{при} \quad r = R_1, \quad (20)$$

где r – полярный радиус ($x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$); R_1 – радиус струи масла.

Решение уравнения (19) с условиями (20) получено в виде

$$v_z(r) = \frac{f_\sigma}{4\mu R_1} (R_1^2 - 2r^2). \quad (21)$$

Максимальная скорость термокапиллярного движения имеет место на межфазной границе (при $r = R_1$):

$$v_{z\max} = -\frac{R_1}{4\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \text{grad} T. \quad (22)$$

Численные значения скоростей $v_{z\max}$ приведены в таблице 1. Радиус R_1 определен из объемной доли подсолнечного масла в смеси на входе в аппарат (при $l = 0$): $c_{AV} = 1 - \frac{3c_A M_B}{\rho_B} = 1 - 0,156 = 0,844$, откуда $R_1 = \sqrt{0,844d/2} = 0,23$ мм.

Учитывая, что термокапиллярная конвекция обратна основному потоку, полученные значения скоростей вполне достаточны для развития на поверхности раздела интенсивного вихревого движения. Результатом ЭФ-воздействия является увеличение объемного коэффициента массопередачи η' и эффективной константы скорости $k'_1(p)$, что более чем в 2 раза интенсифицирует процесс – рисунок 5.

Таблица 1. Численная оценка скоростей $v_{z\max}$ на межфазной границе подсолнечное масло-этанол в проточном микрореакторе ($d = 0,5$ мм) при СВЧ-нагреве реакционной смеси ($f = 2450$ МГц, $\mu_m = 0,896 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\frac{d\sigma}{dT} = 0,13 \cdot 10^{-3}$ Н/(м·К), $R_1 = 0,23$ мм)

p , МВт/м ³	0,47			0,88			1,32			
gradT, К/м	20	10	5	37	20	7	55	30	20	13
$v_{z\max}$, мм/с	0,17	0,08	0,04	0,31	0,17	0,06	0,46	0,25	0,17	0,11

Дополнительным преимуществом ЭФ-способа воздействия на химический процесс в микрореакторах является возможность эффективного управления объектами этого класса.

В заключительной части главы рассмотрены методика и пример расчета микрореактора. Методика включает в себя определение длины микрореактора, продольного градиента температур и мощности СВЧ-генератора, при которой устанавливается режим интенсивной термокапиллярной конвекции.

Глава 4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОРЕАКТОРА ПРИ СВЧ-НАГРЕВЕ

В условиях стимулированной термокапиллярной конвекции интенсивность химического процесса определяется мощностью СВЧ-нагрева смеси. При $\varphi = \text{const} = 3$ это отражается в зависимости констант скорости k_1' и k_2' от удельной мощности p (уравнение (4)). Оценка членов правой части этого уравнения показывает, что влияние на процесс эффективной константы скорости обратной реакции незначительно. Математическая модель непрерывного процесса переэтерификации в микрореакторе при СВЧ-нагреве получена в виде:

$$v \frac{\partial c_A}{\partial l} = -k_1'(p)c_A, \quad c_A|_{l=0} = c_{AH}, \quad (23)$$

где $k_1'(p) = a_2 + a_3 p$; a_2, a_3 – коэффициенты аппроксимации.

Математическая модель динамики объекта получается из уравнения (23):

$$\frac{\partial c_A}{\partial \tau} + v \frac{\partial c_A}{\partial l} = -k_1'(p)c_A, \quad c_A|_{\tau=0} = c_{A0}(l) = c_{AH0} \exp[-k_1'(p_0)l/v_0], \quad c_A|_{l=0} = c_{AH}, \quad (24)$$

где c_{AH0} – значение параметра в установившемся режиме, кмоль/м³.

Задачей управления является стабилизация конечной концентрации $c_{AK} = c_A|_{l=L}$ на заданном уровне: $c_{AK} = c_{AK0}$.

Линеаризованное уравнение динамики объекта в отклонениях получено в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta c_A}{\partial \tau} + v_0 \frac{\partial \Delta c_{A0}}{\partial l} + v_0 \frac{\partial \Delta c_A}{\partial l} + \Delta v \frac{\partial c_{A0}}{\partial l} = -k_1'(p_0)c_{A0} - \\ - k_1'(p_0)\Delta c_A - c_{A0} \frac{dk_1'(p_0)}{dp} \Delta p, \quad \Delta c_A|_{\tau=0} = 0, \quad \Delta c_A|_{l=0} = \Delta c_{AH}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{где } p_0 = -\frac{v_0 \ln\left(\frac{c_{AK0}}{c_{AH0}}\right)}{La_2} - \frac{a_1}{a_2}.$$

Здесь $\Delta c_A, \Delta v, \Delta p$ – переменные во времени отклонения регулируемых и регулирующей величин относительно их значений в установившемся режиме: $\Delta c_A = c_A - c_{A0}$, $\Delta v = v - v_0$, $\Delta p = p - p_0$.

Линеаризованное уравнение динамики объекта в изображениях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \bar{c}_A}{\partial l} + \frac{s + k_1'(p_0)}{v_0} \Delta \bar{c}_A = -\frac{c_{AH0} k_1'(p_0)}{v_0^2} \exp(-k_1'(p_0)l/v_0) \Delta \bar{v} - \\ - \frac{c_{AH0}}{v_0} \exp(-k_1'(p_0)l/v_0) \frac{dk_1'(p_0)}{dp} \Delta \bar{p}, \quad \Delta \bar{c}_A|_{l=0} = 0, \end{aligned} \quad (26)$$

где s – параметр преобразования Лапласа; чертой сверху обозначены изображения переменных по Лапласу.

Из уравнения (26) получаются передаточные функции объекта соответственно по каналу основного возмущения ($\Delta \bar{c}_{AK} - \Delta \bar{c}_{AH}$), каналу управления ($\Delta \bar{c}_{AK} - \Delta \bar{p}$), каналу неконтролируемого возмущения ($\Delta \bar{c}_{AK} - \Delta \bar{v}$):

$$W_1 = \frac{\Delta \bar{c}_{AK}}{\Delta c_{AH}} = B_1 e^{-s\tau_0}, \quad W_2 = \frac{\Delta \bar{c}_{AK}}{\Delta p} = B_2 \frac{1 - e^{-s\tau_0}}{s}, \quad W_3 = \frac{\Delta \bar{c}_{AK}}{\Delta v} = B_3 \frac{1 - e^{-s\tau_0}}{s}, \quad (27)$$

где $B_1 = \exp[-k'_1(p_0)\tau_0]$; $B_2 = -c_{AH0} \frac{dk'_1(p_0)}{dp} \exp(-k'_1(p_0)\tau_0)$;

$B_3 = \frac{c_{AH0} k'_1(p_0)}{v_0} \exp(-k'_1(p_0)\tau_0)$; $\tau_0 = \frac{L}{v_0}$ – время «чистого» запаздывания.

Переходные характеристики объекта исследованы при постоянно действующих возмущениях $\Delta c_{AH} = \text{const}$ и $\Delta v = \text{const}$, а также при $\Delta p = \text{const}$.

Глава 5. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В МИКРОРЕАКТОРЕ

Колебания параметра φ вызывают возмущение по начальной концентрации c_{AH} в смеси – основное действующее на объект возмущение.

На рисунке 7 приведена структурная схема системы автоматической стабилизации выходной концентрации c_{AK} . Отношение расходов Q_B/Q_A пересчитывается вычислителем 3 в значение c_{AH} по формуле, следующей из (7):

$$c_{AH}(\varphi) = \frac{1}{\frac{M_A}{\rho_A} + \frac{Q_B}{Q_A} \frac{M_A}{\rho_A}}, \quad \frac{Q_B}{Q_A} = \varphi \frac{M_B \rho_A}{M_A \rho_B}. \quad (28)$$

Усилительное звено 5 преобразует значение c_{AH} в электрический сигнал. Регулятор 6, воздействуя на регулирующий орган 7, изменяет управляющее напряжение на его входе пропорционально возникшему рассогласованию $\Delta U_{изм}$. Выработанное таким образом управляющее воздействие Δp обеспечивает стабилизацию выходной концентрации c_{AK} . Переходная характеристика системы (при использовании П-регулятора: $\Delta p = k_{пер.1} \Delta c_{AH}$) получена в виде

$$\Delta c_{AK}(\tau) = \begin{cases} \frac{B_{11} k_{пер.1} \Delta c_{AH} \tau}{p_0} & \text{при } \tau < \tau_0, \\ \frac{B_{11} k_{пер.1} \Delta c_{AH}}{p_0} \tau_0 + B_{12} \Delta c_{AH} & \text{при } \tau \geq \tau_0, \end{cases} \quad (29)$$

где $k_{пер.1} = \frac{dp(c_{AH0})}{dc_{AH}} = \frac{v_0}{La_2 c_{AH0}}$, $B_{11} = -\frac{e^{(a_2 + a_3 p_0)\tau_0}}{a_2 c_{AH0}}$, $B_{12} = \frac{a_2}{c_{AH0}}$.

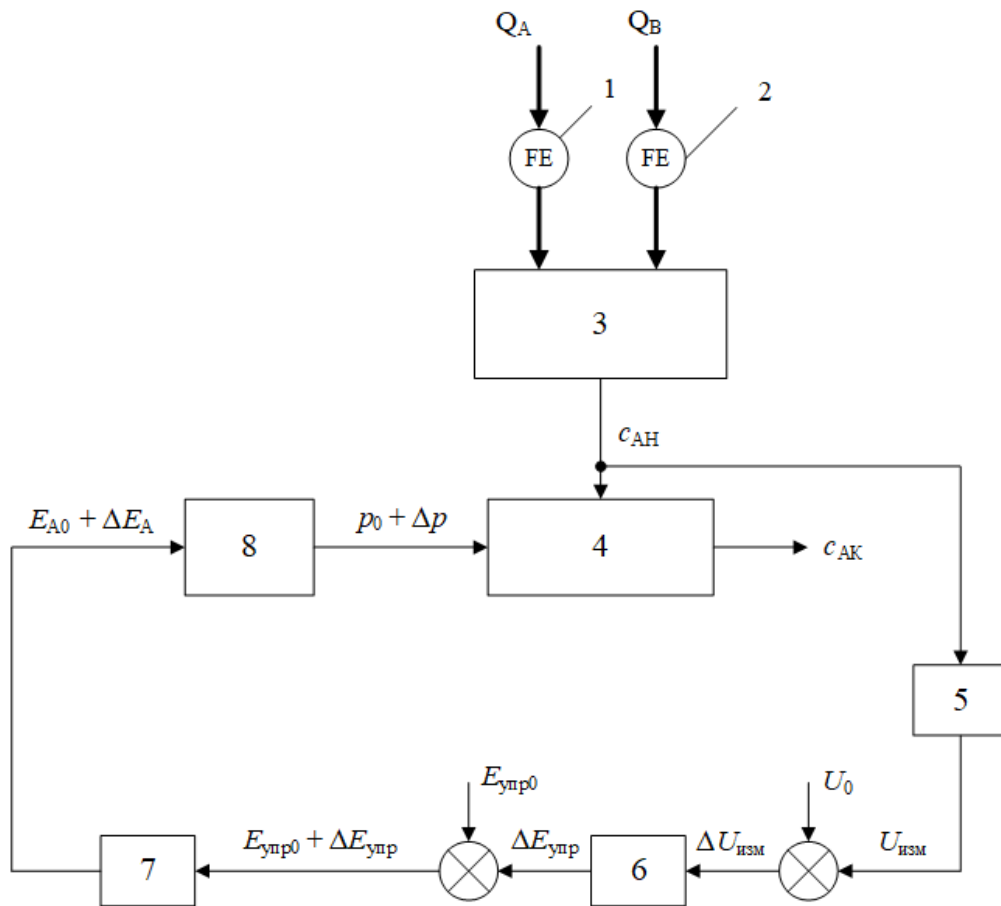


Рисунок 7 – Структурная схема системы автоматической стабилизации конечной (выходной) концентрации c_{AK} в процессе перегретификации: 1, 2 – расходомеры, 3 – вычислитель величины c_{AH} , 4 – объект, 5 – преобразователь сигнала $c_{AH} \rightarrow U_{изм}$ (усилительное звено), 6 – регулятор, 7 – регулируемый выпрямитель (регулятор мощности), 8 – СВЧ-генератор

Система на рисунке 7, построенная по принципу регулирования по возмущению, в отличие от системы, работающей по отклонению, не обладает запаздыванием, но не отрабатывает неконтролируемые возмущения.

Далее рассмотрена задача синтеза системы управления, способной эффективно противостоять как контролируемым, так и неконтролируемым возмущениям. Система на рисунке 8 содержит два контура регулирования: по возмущению – блоки 1, 4 и по отклонению – блоки 1, 2, 3, 5. Второй контур, работающий по отклонению, построен по принципу самонастраивающейся системы с обучающейся моделью.

Выходная концентрация c_{AK} измеряется непрерывно. Параллельно объекту 1 включена обучающаяся модель 2, для подстройки которой служит блок 3. Модель используется для исключения влияния на выходной процесс системы неконтролируемых возмущений. Выход модели $c_{AKM}(\tau)$ сравнивается с выходом объекта $c_{AK}(\tau)$, а замыкание системы осуществляется сигналом

$$z(\tau) = c_{AKM}(\tau) + \varepsilon(\tau), \quad (30)$$

где $\varepsilon(\tau)$ – результат сравнения процессов $c_{AK}(\tau)$ и $c_{AKM}(\tau)$.

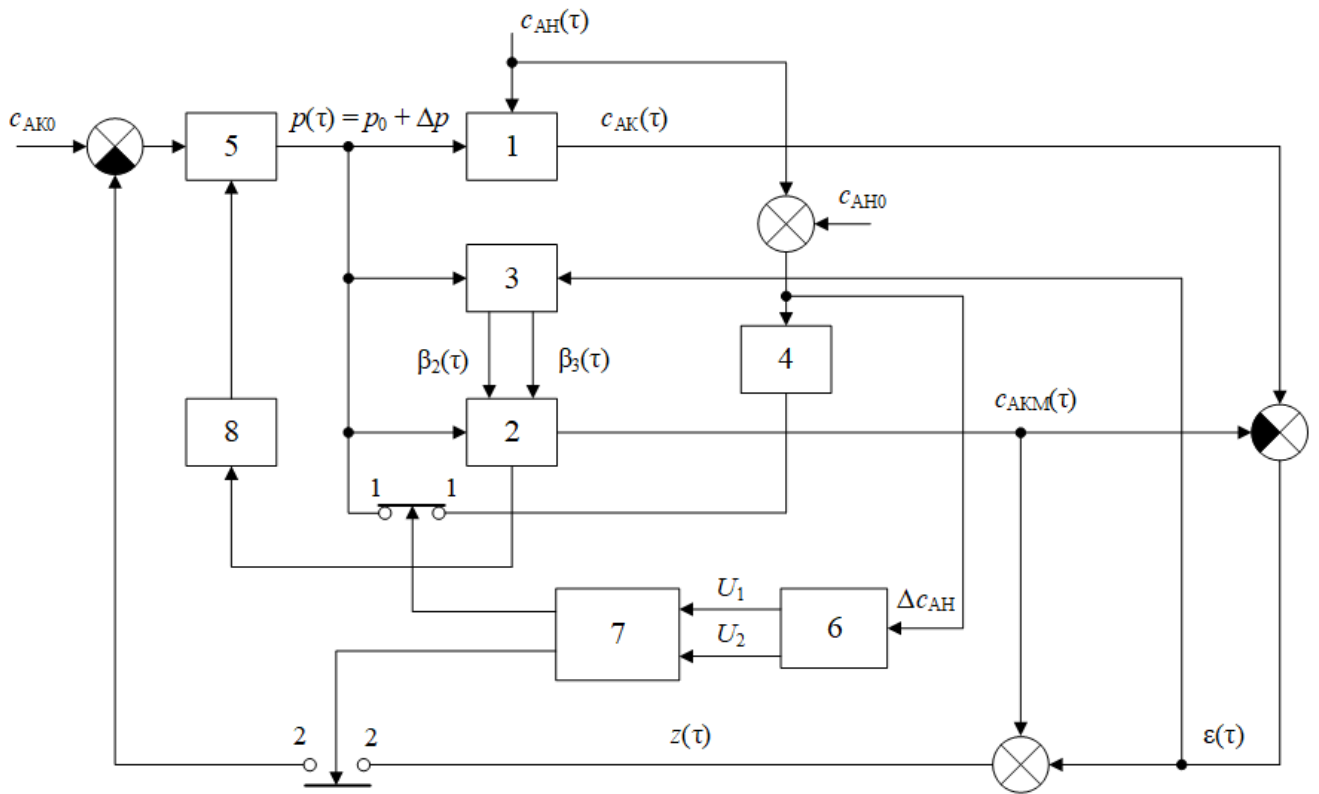


Рисунок 8 – Структурная схема самонастраивающейся системы управления химическим процессом с обучающейся моделью: 1) объект, 2) модель объекта, 3) блок подстройки модели, 4) регулятор системы (контура) управления по возмущению, 5) регулятор системы (контура 2) управления по отклонению, 6) анализатор уровня сигнала, 7) командное устройство, 8) блок подстройки системы (контура 2)

Контуры автоматического регулирования 1, 4 и 1, 2, 3, 5 работают попеременно. Передаточная функция регулятора 2 определяется из анализа передаточной функции объекта W_2 по каналу управления:

$$W_{\text{per.2}} = \frac{k_{\text{per.2}}}{1 - e^{-S\tau_0}}, \quad (31)$$

где $k_{\text{рег.2}}$ – коэффициент усиления регулятора 2.

Для определения реакции системы на неконтролируемое возмущение регулируемый параметр Δc_{AK} выражается через возмущающее воздействие $\Delta \dot{v}$:

$$\Delta \bar{C}_{AK}(s) = \frac{W_3}{1 + W_{\text{pas.2}}} \Delta \bar{v}, \quad (32)$$

где $W_{\text{раз.2}} = W_2 W_{\text{пер.2}} = \frac{k_{\text{пер.2}} B_2}{s}$ – передаточная функция разомкнутого контура.

Из (32) при возмущении $\Delta \bar{v} = \frac{C_0}{s}$, где C_0 – произвольная постоянная, получаются решения – рисунок 9:

$$\Delta \bar{c}_{AK}(s) = \frac{C_0 B_3 (1 - e^{-s\tau_0})}{s(s + B_2 k_{per,2})}. \quad (33)$$

$$\Delta c_{AK}(\tau) = \begin{cases} \frac{C_0 B_3}{B_2 k_{per.2}} \left(1 - e^{-B_2 k_{per.2} \tau} \right) & \text{при } \tau < \tau_0, \\ \frac{C_0 B_3}{B_2 k_{per.2}} \left(e^{-B_2 k_{per.2} \tau_0} - 1 \right) e^{-B_2 k_{per.2} \tau} & \text{при } \tau \geq \tau_0. \end{cases} \quad (34)$$

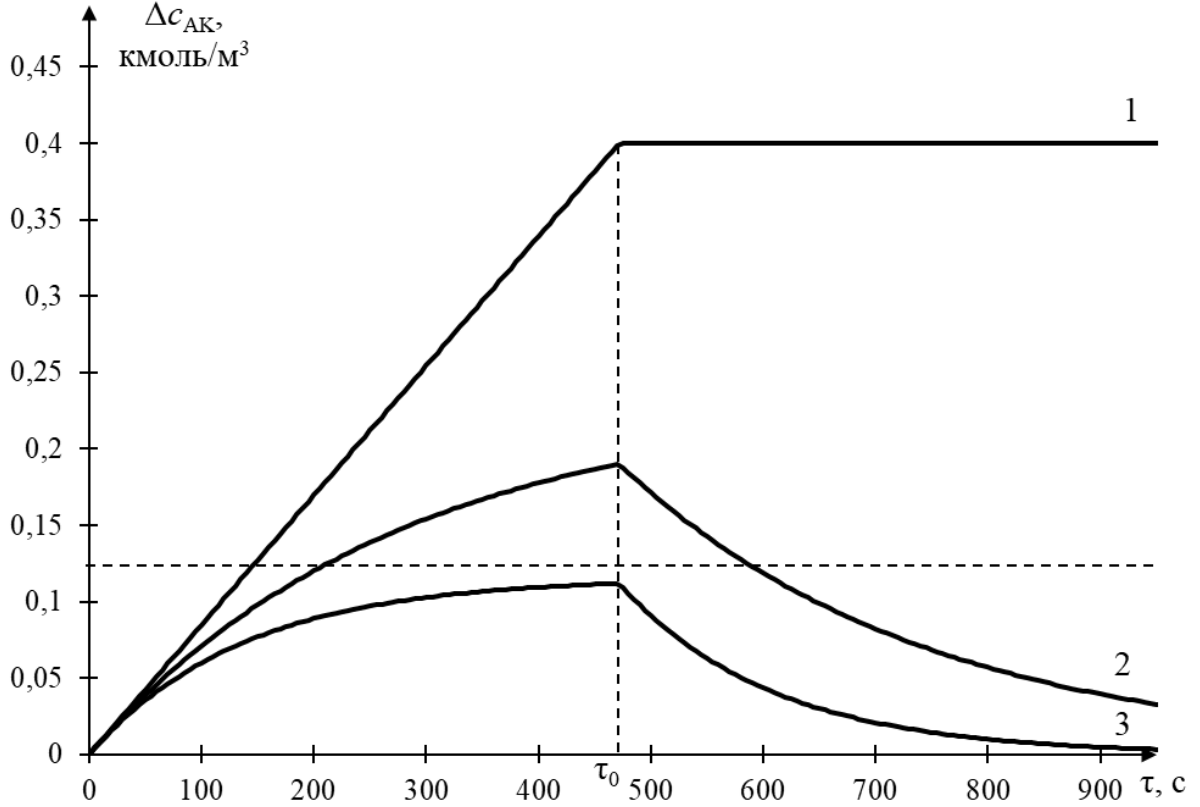


Рисунок 9 – Динамические характеристики микрореактора и самонастраивающейся системы при неконтролируемом возмущении $\Delta v = -0,2v_0 = -0,42$ мм/с ($c_{AH} = 0,891$ кмоль/м³, $p_0 = 1,15$ МВт/м³, $L = 1000$ мм): 1 – объект без управления; 2 – система стабилизации c_{AK} при $k_{per.2} = 9 \cdot 10^3$ Вт/м³; 3 – система стабилизации c_{AK} при $k_{per.2} = 18 \cdot 10^3$ Вт/м³

Отдельного внимания заслуживает вопрос подстройки блоком 3 параметров модели под изменяющиеся в динамике параметры объекта. Используя сигнал $\varepsilon(\tau)$, блок 3 осуществляет подстройку параметров модели до тех пор, пока возникшее рассогласование не станет равным нулю или допустимому значению. Тогда параметры модели будут равны новым значениям параметров объекта B_{22} и B_{33} . Выход обученной модели подается на вход блока 8 подстройки системы, который корректирует задание регулятору 5.

Алгоритм обучения модели реализован методом градиента. Уравнение динамики объекта записывается в упрощенном виде

$$B_{22}(\tau)c_{AK}(\tau) + B_{33}(\tau)\frac{dc_{AK}}{d\tau} = p(\tau). \quad (35)$$

Обучение модели состоит в слежении за коэффициентами объекта:

$$\beta_2(\tau)c_{AKM}(\tau) + \beta_3(\tau)\frac{dc_{AKM}}{d\tau} = p(\tau). \quad (36)$$

Здесь $\beta_2(\tau)$ и $\beta_3(\tau)$ – переменные во времени коэффициенты модели.

Процесс подстройки (обучения) модели описывается уравнениями с переменными коэффициентами

$$\frac{d\beta_2}{d\tau} = -q \frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \beta_2}; \quad \frac{d\beta_3}{d\tau} = -q \frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \beta_3}, \quad (37)$$

где q – коэффициент пропорциональности; $f(\varepsilon)$ – функция рассогласования ε

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = (\varepsilon + r_1 \dot{\varepsilon})^2, \quad (38)$$

принимая при $\beta_2 = B_{22}$, $\beta_3 = B_{33}$ минимальное значение; r_1 – коэффициент, изменяющий скорость подстройки параметров модели.

Будем считать, что выходной процесс объекта $c_{AK}(\tau)$ не зависит от параметров модели, т.е. $\frac{\partial c_{AK}}{\partial \beta_i} = \frac{\partial \dot{c}_{AK}}{\partial \beta_i} = 0$. Тогда, ограничиваясь частными производными от функции $f(\varepsilon)$ первого порядка, можно записать

$$\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \beta_2} = 2(\varepsilon + r_1 \dot{\varepsilon}) \cdot \left(\frac{\partial c_{AKM}}{\partial \beta_2} + r_1 \frac{\partial \dot{c}_{AKM}}{\partial \beta_2} \right), \quad (39)$$

$$\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \beta_3} = 2(\varepsilon + r_1 \dot{\varepsilon}) \cdot \left(\frac{\partial c_{AKM}}{\partial \beta_3} + r_1 \frac{\partial \dot{c}_{AKM}}{\partial \beta_3} \right). \quad (40)$$

Алгоритм (37) обеспечивает определение коэффициентов β_2 и β_3 по выражениям (39), (40) с использованием приближенной процедуры вычисления частных производных:

$$\frac{\partial c_{AK}}{\partial \beta_2} = \beta_2 \frac{\partial c_{AKM}}{\partial \beta_2} + \beta_3 \frac{\partial \dot{c}_{AKM}}{\partial \beta_2} + c_{AKM}(\tau) = 0, \quad (41)$$

$$\frac{\partial c_{AK}}{\partial \beta_3} = \beta_2 \frac{\partial c_{AKM}}{\partial \beta_3} + \beta_3 \frac{\partial \dot{c}_{AKM}}{\partial \beta_3} + \frac{\partial c_{AKM}}{\partial \tau} = 0. \quad (42)$$

Алгоритм обучения модели реализован программно и приведен в диссертации.

На рисунке 10 приведена структурная схема АСУ химическим процессом в микрореакторе (сети параллельно работающих микрореакторов).

По сигналу $\varepsilon(\tau)$ вычислитель осуществляет автоматический поиск минимума функции $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ и определяет коэффициенты модели β_2 и β_3 . По алгоритму (41), (42) блок подстройки непрерывно обучает модель. Для корректировки задания регулятору 2 служит блок подстройки системы.

АСУ наряду со стандартными функциями осуществляет интеллектуальную поддержку процесса управления: управляющие воздействия объекту выдаются на основе встроенного в контроллер алгоритма обучения модели изменяющимся в динамике параметрам объекта.

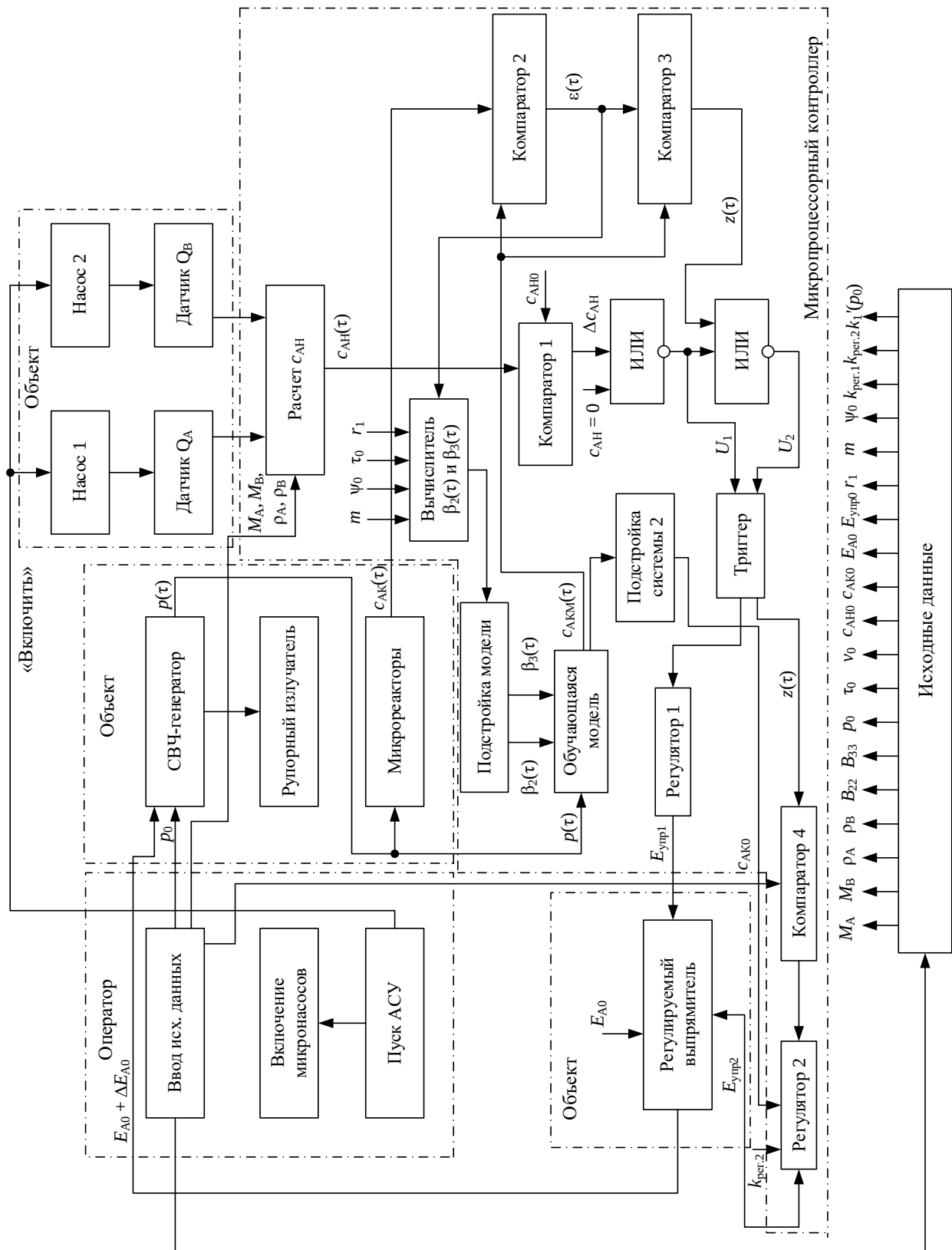


Рисунок 10 – Структурная схема АСУ химическим процессом в микрореакторах при СВЧ-нагреве

Реализация этого алгоритма в сочетании с рассмотренными характеристиками системы в условиях контролируемого и неконтролируемого возмущений по исследованным каналам позволит обеспечить высокое качество управления сетью производственных химических процессов в микрореакторах.

В приложениях к диссертации приведены: справочные данные и результаты расчета скоростей термокапиллярного движения (**Приложение А**), программные комплексы и программы (**Приложение Б**), акт внедрения результатов диссертационной работы (**Приложение В**).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и исследован высокоинтенсивный процесс переэтерификации подсолнечного масла этанолом в микрореакторе, предусматривающий неравномерный СВЧ-нагрев компонентов реакции. Показано, что неравномерный по длине микрореактора нагрев компонентов реакции обеспечивает интенсификацию химического процесса в 2–2,6 раза за счет развития эффекта термокапиллярной конвекции. Приведена численная оценка скоростей термокапиллярного движения на поверхности раздела фаз в зависимости от продольного градиента температуры.

2. Разработана математическая модель процесса переэтерификации растительного масла в микрореакторе, учитывающая влияние на его интенсивность количественного состава компонентов и стимулированной СВЧ-нагревом эффекта термокапиллярной конвекции. Разработана методика расчета микрореактора при СВЧ-нагреве.

3. Показана эффективность применения неравномерного СВЧ-нагрева компонентов реакции как способа интенсификации химического процесса в микроканалах и одновременно как технического решения, обеспечивающего возможность организации эффективного управления объектом путем использования безынерционного источника тепла.

4. Разработана динамическая модель процесса переэтерификации подсолнечного масла этанолом в микрореакторе при дополнительном СВЧ-нагреве. Исследованы статические и динамические характеристики микрореактора – объекта с распределенными параметрами нового типа, реализующего механизм термокапиллярной конвекции.

5. Разработана интеллектуальная автоматизированная система управления химическим процессом в микрореакторе (сети микрореакторов) при СВЧ-нагреве. Входящая в состав АСУ автоматическая система с обучающейся моделью реализует принцип интеллектуальной поддержки процесса управления путем обучения (самонастройки) параметров модели под изменяющиеся в динамике параметры объекта.

6. Показана высокая динамическая точность самонастраивающейся системы управления химическим процессом в микрореакторе при СВЧ-нагреве в условиях воздействия на объект контролируемых и неконтролируемых возмущений.

7. Способ проведения химического процесса в микрореакторах при дополнительном СВЧ-нагреве использован при проектировании опытной установки для получения этиловых эфиров жирных кислот (ООО «Аркософт», г. Санкт-Петербург, 2022).

Публикации соискателя по теме диссертации

Статьи в журналах из рекомендованного ВАК РФ перечня

1. Боровков, В. А. Математическое моделирование и оптимизация процесса получения биодизельного топлива в микрореакторе / В. А. Боровков, А. В. Марков, Е. С. Боровинская, Ю. П. Юленец // Информационные системы и технологии. – 2020. – №6 (122). – С. 14–21.
2. Боровков, В. А. Электрофизический метод в технологии получения биодизельного топлива в микрореакторе / В. А. Боровков, Ю. П. Юленец // Известия СПб гос. технол. ин-та (техн. ун-та). – 2021. – №56 (82). – С. 38–43.
3. Боровков, В. А. Самонастраивающаяся система с обучающейся моделью для управления химическим процессом в микрореакторе / В. А. Боровков, А. В. Марков, Ю. П. Юленец // Известия СПб гос. технол. ин-та (техн. ун-та). – 2022. – №60 (86). – С. 50–55.

Статьи в рецензируемых журналах

4. Марков, А. В. Влияние состава исходных компонентов на эффективность синтеза биодизельного топлива в микрореакторе / А. В. Марков, В. А. Боровков, Ю. П. Юленец // Математические методы в технике и технологиях. – 2020. – С. 53–56.
5. Боровков, В. А. Механизм химического процесса в микрореакторе при стимулированной термокапиллярной конвекции / В. А. Боровков, Ю. П. Юленец, А. В. Марков // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – №6. – С. 44–48. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_6_44.
6. Боровков, В. А. Влияние неравномерного СВЧ-нагрева системы жидкость-жидкость на интенсивность химического процесса в микрореакторе / В. А. Боровков, А. В. Марков, Ю. П. Юленец // Электронная обработка материалов. – 2022. – (в печати).

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021661269 Российская Федерация. Программный комплекс для исследования процесса получения биодизельного топлива в микрореакторе / В. А. Боровков; правообладатель В. А. Боровков. – № 2021660310; дата поступл. 29.06.2021; дата регистр. 07.07.2021, Бюл. № 7. – 2 с. : ил.
8. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 24957 Российская Федерация. Программный комплекс для исследования статистики и динамики микрореактора для проведения химических процессов / В. А. Боровков, Ю. П. Юленец. – № 24957; дата регистр. 04.03.2022, Хроники Объединенного фонда электронных ресурсов, Москва: Наука и образование. Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, 2022. – № 3(154). – С. 26. DOI: <http://doi.org/10.12731/ofernio.2022.3>; http://ofernio.ru/rto_files_ofernio/24957.doc – Текст: электронный.

9. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 25042 Российская Федерация. Программный комплекс для обучения модели в самонастраивающейся системе управления химическим процессом / В. А. Боровков. – № 25042; дата регистр. 08.11.2022, Хроники Объединенного фонда электронных ресурсов, Москва: Наука и образование. Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, 2022. – № 11(162). – С. 32. DOI: <http://doi.org/10.12731/ofernio.2022.25042>;
http://ofernio.ru/rto_files_ofernio/25042.doc – Текст: электронный.

Доклады на конференциях

10. Боровков, В. А. Математическая модель процесса получения биодизельного топлива в микрореакторе непрерывного действия / В. А. Боровков, Ю. П. Юленец // Приоритетные направления развития науки и технологий: Доклады XXVI междунар. научно-практич. конф.; под общ. ред. В. М. Панарина. Тула: Инновационные технологии, 2019. – С. 139–141.

11. Боровков, В. А. Выбор ключевых компонентов реакции этанолиза растительных масел / В. А. Боровков, Ю. П. Юленец // IX научно-техническая конференция «Неделя науки–2019». – Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2019. – С. 261.

12. Марков, А. В. Влияние состава исходных компонентов на эффективность синтеза биодизельного топлива в микрореакторе / А. В. Марков, В. А. Боровков, Ю. П. Юленец // Сборник трудов XXXIII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – ММТТ-33. В 12 т. Т. 4. / Под общ. ред. А. А. Большакова. – СПб: Изд-во Политехнического университета Петра Великого, 2020. – С. 53–56.

Прочие публикации

13. Боровков, В. А. Программный комплекс для исследования статистики и динамики микрореактора для проведения химических процессов / В. А. Боровков, Ю. П. Юленец // Навигатор в мире науки и образования: сетевое издание, 2022. – № 01 (54). – С. 299–303. – URL: [http:// ofernio.ru/portal/navigator/navigator_nomera](http://ofernio.ru/portal/navigator/navigator_nomera), свободный.