

В совет по защите докторских и кандидатских
Диссертаций Д. 24.2.383.05 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

ОТЗЫВ

Официального оппонента Гордиенко Марии Геннадьевны на
диссертационную работу Боровкова Владимира Андреевича «Методы
интенсификации и управления химическим процессом в микрореакторе в
условиях стимулированной СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции» на
соискание учёной степени кандидата технических наук по специальностям

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

Представленная диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения,
содержит 143 страницы, включая 3 приложения, 20 рисунков, 16 таблиц и
список литературы из 134 наименований.

Актуальность диссертационной работы

Современная повестка развития РФ направлена на разработку и
внедрения в промышленность современных технологий, направленных на
импортозамещение, в том числе на синтез широкого спектра спектра
химических соединений. Химические реактора, применяемые на

производствах химической и фармацевтической промышленности, имеют ряд недостатков снижающих эффективность проводимых химических реакций и приводящих к синтезу побочных продуктов, в том числе инертность отклика на управляющее воздействие, наличие градиента температур и скоростей (наличие застойных зон и локальных зон перегрева) и ряд других. Микрореакторные технологии позволяют создать равномерные ламинарные потоки внутри чипа или, в случае необходимости, интенсивное перемешивание потока, обеспечить эффективное поддержание температурного режима вдоль всего канала микрореактора, большую поверхность контакта с катализатором. Микрореактора относятся к легко масштабируемым системам, поскольку для увеличения производительности достаточно увеличить количество отдельных чипов (микрореакторных единиц) без их масштабирования.

Микрореакторные технологии являются перспективным развивающимся направлением и еще не все аспекты их работы изучены. В связи с этим, изучение и развитие методов интенсификации и управления химическим процессом в микрореакторе в условиях стимулированной СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции является актуальной задачей.

Оценка содержания диссертации и степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В первой главе рассмотрены работы в области теоретического и экспериментального исследования химических процессов в двухфазных системах. Проанализированы наиболее распространенные модели химических реакторов, отдельное внимание уделено факторам, снижающим эффективность реакторов. Отмечено, что преимущества микрореакторов как технологического оборудования используются на практике не в полной мере, в том числе показано, что часть наблюдаемых эффектов до сих пор не получило теоретического обоснования и требует дополнительного изучения. Высказано предположение, что неравномерный СВЧ-нагрев компонентов

реакции способен обеспечить дополнительную движущую силу процесса за счет развития эффекта термокапиллярной конвекции (эффекта Марангони).

Использование СВЧ-нагрева как безынерционного источника тепла одновременно открывает перспективу эффективного управления химическим процессом в микрореакторе – объекте с распределенными параметрами. Отмечено, что постановке задач управления химическими реакторами в литературе уделяется мало внимания, а динамические характеристики этих объектов исследованы недостаточно.

Перспективным подходом к управлению объектами и процессами является применение в составе автоматических и автоматизированных систем обучающейся модели, что позволит перейти к динамическим системам управления микрореакторами.

Во **второй главе** представлены результаты экспериментального исследования и теоретического обписания химического процесса переэтерификации подсолнечного масла этанолом в микрореакторе. Построена математическая модель стационарных режимов процесса в микрореакторе непрерывного действия, определена зависимость начальной концентрации ключевого компонента в смеси этанол-масло от мольного отношения компонентов, экспериментально исследованы зависимости констант скорости реакции от количественного состава смеси, решена задача оптимизации режима микрореактора изменением количественного состава компонентов. Выдвинуто предположение о возникновении эффекта концентрационно-капиллярной конвекции в результате снижения межфазного поверхностного натяжения при использовании избыточного по сравнению со стехиометрическим содержания этилового спирта в смеси подсолнечное масло-этанол, что приводит к интенсификации процесса переэтерификации.

В **третьей главе** предложен и исследован электрофизический способ воздействия на компоненты реакции СВЧ-излучением, стимулирующим развитие термокапиллярной конвекции. Показано, что неравномерный СВЧ-

нагрев реакционной смеси резко интенсифицирует химический процесс. Соискателем В.А. Боровковым дана численная оценка максимальных скоростей термокапиллярного движения на границе раздела фаз с учетом удельной мощности внутренних источников тепла.

Показано, что использование СВЧ-нагрева как безынерционного источника тепла является эффективным решением для обеспечения возможности управления микрореактором, поскольку позволяет добиться значительных градиентов температур по длине канала не смотря на малое время пребывания компонентов реакционной смеси в микрореакторе.

Разработана методика и приведен пример расчета микрореактора с учетом СВЧ-нагрева, способствующему увеличению движущей силой процесса.

Четвертая глава посвящена исследованию динамических характеристик микрореактора при СВЧ-нагреве. Выделены управляющее и возмущающие воздействия, записана и проанализирована система передаточных функций объекта.

Задача управления состояла в стабилизации конечной концентрации подсолнечного масла в микрореакторе на заданном уровне. Построена линеаризованная модель объекта в отклонениях. Модель преобразована в операторную форму, получены передаточные функции объекта по каналам возмущения и управления. На основе полученных передаточных функций с использованием программного комплекса исследованы динамические характеристики объекта по всем каналам.

В пятой главе основное внимание уделено разработке автоматизированной системы управления микрореактором (сетью параллельно работающих микрореакторов). Основой АСУ служит самонастраивающаяся автоматическая система с обучающейся моделью. Модель предназначена для исключения влияния на выходной процесс системы неконтролируемых возмущений. Используя разностный сигнал между выходами объекта и модели, блок подстройки модели по

предложенному соискателем алгоритму обучает модель, подстраивая ее параметры до тех пор, пока рассогласование не станет равным допустимому значению.

Встроенная в микроконтроллер расчетная процедура обучения модели изменяющимся в динамике параметрам объекта в сочетании с динамической точностью самонастраивающейся системы по исследованным каналам обеспечивает высокое качество управления химическим процессом.

В **Приложении А** размещены справочные данные о физических и физико-химических свойствах компонентов и продуктов реакции; в **Приложении Б** представлен листинг программного кода программного комплекса для обучения модели в самонастраивающейся системе управления химическим процессом; в **Приложении В** приведены сведения о практическом использовании результатов диссертации.

Новизна и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

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).

Апробация результатов работы приведена на международных конференциях и семинарах. 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.

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 значимость диссертационной работы заключается в предложенных математических моделях статики и динамики химического процесса в микрореакторе, учитывающих влияние на его интенсивность термокапиллярной конвекции; постановке и решении задачи управления сложным химико-технологическим объектом, использующим физический метод воздействия на компоненты реакции; в численной оценке скоростей термокапиллярного движения на межфазной границе жидкость-жидкость при переменном по длине аппарата градиенте температур; в разработанной включенной в состав АСУ самонастраивающаяся системы с обучающейся моделью, обеспечивающая высокое качество управления, в том числе при изменяющихся динамических свойствах объекта.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке методики расчета химического процесса в микрореакторе при СВЧ-нагреве; программного комплекса и электронных ресурсов для исследования статических и динамических характеристик микрореактора в условиях стимулированной СВЧ-воздействием термокапиллярной конвекции; разработан алгоритм обучения и самонастройки модели под изменяющиеся динамические свойства объекта управления; предложены структурные схемы автоматической и автоматизированной систем управления микрореактором при СВЧ-нагреве.

Личное участие соискателя учёной степени в получении результатов, изложенных в диссертации

Диссертационная работа В.А. Боровкова является научной работой, выполненной самостоятельно. Личный вклад соискателя состоит в проведении эксперимента, разработке математических моделей и алгоритмов, написании программы, проверке адекватности и интерпретации

полученных данных, формулировании выводов, написании публикаций, отчетов по проектам.

Основные теоретические и практические положения диссертации, результаты исследования неоднократно докладывались автором на международных научно-практических конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1. Требуется пояснения как определяли концентрации реагентов и продуктов реакции при проведении экспериментальных исследований процесса переэтерификации подсолнечного масла этанолом при СВЧ-нагреве (Глава 3). Какова точность метода? Какова точность поддержания температуры микрореактора?
2. Из работы не ясно, была ли апробирована автоматизированная система управления химическим процессом в микрореакторе или только в условиях вычислительного эксперимента. Также требуется пояснения, в случае управления сетью микрореакторов управление для каждого из микрореакторов осуществляется отдельно? Как подключены микрореактора к питающим насосам (у каждого свой, общая система подачи и т.д.)?
3. Приложение А содержит описание определения скорости термокапиллярной конвекции в микроканалах. Требуется пояснения как выбиралась толщина (глубина) слоя до границы раздела, обозначенная литерой « h » (см. уравнения А.3, А.6 и А.7). В таблице А.15 приведены расчеты для диапазона значений от 0,2 до 1,0 мм, при этом не указан диаметр микроканала. Какие параметры работы микрореактора будут влиять на толщину слоя до границы раздела?
4. В описании программного комплекса (Приложение Б) указано, что в качестве возмущающего воздействия возможно использовать ступенчатое, импульсное, синусоидальное воздействие по любому каналу. С точки зрения практической реализации какие диапазоны

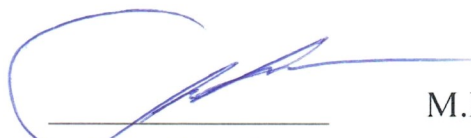
характеристик импульсного воздействия возможны; как может быть реализовано технически синусоидальное воздействие?

Несмотря на сделанные замечания диссертация В.А. Боровкова заслуживает положительной оценки. Диссертационная работа представляет собой комплексное исследование, выполненное на актуальную тему. Научная новизна работы не вызывает сомнений, так как в диссертации впервые предложено и научно обоснованно новое техническое решение задачи повышения интенсивности химических процессов в микрореакторах, основанное на стимулированном СВЧ-нагревом эффекте термокапиллярной конвекции. Заявленные для достижения поставленной цели задачи диссертации полностью решены. Положения, выносимые на защиту, вполне отражают основные результаты диссертационной работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Публикации автора в рецензируемых научных журналах и широкая апробация результатов диссертации на научных конференциях свидетельствуют о глубокой проработке автором темы исследования.

На основании изложенного считаю, что диссертация «Методы интенсификации и управление химическим процессом в микрореакторе в условиях стимулированной СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для методологии развития теории и практики химических процессов в микрореакторах, а также разработки научных основ и методов построения автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами. Диссертация соответствует критериям, установленным пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., №842 (с изменениями), а её автор, Боровков Владимир Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий

(технические науки), 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Официальный оппонент


17.05.2015

М.Г. Гордиенко

Гордиенко Мария Геннадьевна: доктор технических наук, 05.17.08, доцент. Российский государственный химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, профессор кафедры химического и фармацевтического инжиниринга. Почтовый адрес РХТУ им. Д.И. Менделеева: 125047, Российская Федерация, Москва, Миусская площадь, 9.

+7(495) 495-00-29, e-mail: pochta@muctr.ru, gordienko.m.g@muctr.ru

Подпись М.Г. Гордиенко удостоверяю:

Подпись *М.Г. Гордиенко*
УДОСТОВЕРЯЮ
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
РХТУ им. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА



(Н.К. Каминцев)

С отзывом официального
оппонента ознакомиен

 Боровков В.А.