

УТВЕРЖДАЮ

и.о. проректора по научной работе
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технологический университет»,
Д.Т.Н. профессор



Р.Р. Сафин

2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе
Боровкова Владимира Андреевича «Методы интенсификации и
управление химическим процессом в микрореакторе в условиях
стимулированной СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции»,
представленной на соискание 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)

Диссертация В.А. Боровкова посвящена разработке нового метода интенсификации химических процессов в микрореакторах, основанного на явлении термокапиллярной конвекции. Влияние на химические процессы в микроканалах нестандартных гидродинамических условий движения жидкостей, обусловленных неравномерным по длине микроканала нагревом двухфазной системы, ранее не исследовалось. Тем самым определяется актуальность темы диссертации. Особые преимущества предложенного технического решения заключаются в том, что для его реализации использован безынерционный источник тепла – СВЧ-нагрев реакционной смеси в лучевой камере, обеспечивающий условия эффективного управления процессом в микрореакторе. Методология создания автоматизированных систем управления химико-технологическими процессами в микрореакторах, протекающих в условиях организованной термокапиллярной конвекции (автор обоснованно считает эти аппараты объектами нового типа) не разработана, что

обуславливает актуальность темы диссертации как комплексного исследования, выполненного на стыке двух научных специальностей.

Целью диссертационной работы В.А. Боровкова являлась разработка химического процесса в микрореакторе, основанного на неравномерном по длине аппарата нагреве компонентов реакции, а также разработка методологических основ построения АСУ процессом в микрореакторе (сети микрореакторов), протекающем в нестандартных гидродинамических условиях термокапиллярной конвекции.

Задачами диссертации, призванными обеспечить достижение заявленной цели работы, являлись:

- разработка эффективного, использующего неравномерный СВЧ-нагрев компонентов реакции для развития термокапиллярной конвекции, химического процесса перэтерификации подсолнечного масла этанолом в микрореакторе;
- 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.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения научной новизны, теоретической и практической значимости работы, выделены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава (аналитический обзор) посвящена критическому анализу современного состояния исследований химических процессов в двухфазных системах жидкость-жидкость, а также исследований в области автоматизации химических реакторов. Рассмотрены различные модельные представления о процессах в химических реакторах и микрореакторах. Показано, что преимущества микрореакторов используются на практике не в полной мере. Выделено явление термокапиллярной конвекции как перспективный способ интенсификации химических процессов в узких каналах, для реализации которого необходимо обеспечить градиент температуры по длине аппарата. Подчеркнуты физические достоинства СВЧ-нагрева жидкостей как способа создания горизонтального градиента температур и развития термокапиллярного движения и одновременно безынерционного внутреннего источника тепла как

наиболее эффективного способа управления микрореактором. Проанализированы различные подходы, применяемые для совершенствования автоматизированных систем управления химико-технологическими объектами.

Во второй главе теоретическим и экспериментальным путем исследован химический процесс переэтерификации подсолнечного масла этанолом в микрореакторе. Исследование выполнено без привлечения СВЧ-нагрева – электрофизического способа воздействия на компоненты химической реакции. Заслуживает внимания физико-химическая интерпретация полученной экстремальной зависимости производительности микрореактора от мольного отношения компонентов реакции, предвещающая целесообразность дальнейшего применения СВЧ-нагрева как безынерционного источника тепла.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию химического процесса в микрореакторе, протекающего в условиях стимулированной неравномерным СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции. Эта часть диссертации отличается новыми, интересными результатами. К их числу относятся: способ неравномерного нагрева реакционной смеси в микрореакторе с помощью лучевой СВЧ-камеры закрытого типа, обеспечивающий развитие термокапиллярной конвекции на поверхности раздела двухфазной системы жидкость-жидкость как следствие неоднородности поверхностного натяжения; теоретический анализ гидродинамики движения жидкостей под действием стимулированного неравномерным СВЧ-нагревом продольного градиента температур, выполненный с целью раскрытия механизма процесса; методика расчета микрореактора при дополнительном СВЧ-нагреве – объекте нового типа.

В четвертой главе исследованы динамические характеристики микрореактора непрерывного действия с дополнительным внутренним источником тепла. Показано, что по каналу основного возмущения «конечная концентрация ключевого компонента реакции – начальная концентрация ключевого компонента реакции» микрореактор характеризуется «чистым» запаздыванием, а по каналу неконтролируемого возмущения и, что наиболее важно, по каналу управления запаздывание отсутствует.

Пятая глава посвящена разработке автоматизированной системы управления химическим процессом в микрореакторе. Предложенная АСУ содержит в своем составе обучающуюся модель, которая обеспечивает компенсацию неконтролируемых возмущений. Отдельного внимания заслуживает реализованный программно алгоритм обучения модели изменяющимся в динамике параметрам (коэффициентам) объекта. В главе показано, что предложенная АСУ как интеллектуальная система с

обучающейся моделью в канале управления с высокой точностью отрабатывает как контролируемые, так и неконтролируемые возмущения.

Научная новизна диссертационной работы:

- разработан и теоретически обоснован способ интенсификации химических процессов в микрореакторе путем стимулированной неравномерным СВЧ-нагревом двухфазной системы жидкость-жидкость термокапиллярной конвекции;
- математическая модель и методика расчета микрореактора при дополнительном СВЧ-нагреве, обеспечивающем протекание химического процесса в новых гидродинамических условиях термокапиллярной конвекции;
- динамические характеристики микрореактора с дополнительным внутренним источником тепла по каналам управления и возмущения – объекта с распределенными параметрами, реализующего механизм термокапиллярной конвекции;
- интеллектуальная автоматизированная система управления химическим процессом в микрореакторе, построенная по принципу самонастраивающейся системы с обучающейся моделью, обеспечивающая исключение влияния на выходной процесс объекта и системы неконтролируемых возмущений, в том числе при изменяющихся в динамике параметрах объекта.

Практическую значимость диссертационной работы составляют методика расчета микрореактора при дополнительном СВЧ-нагреве реакционной смеси; программный комплекс и электронные ресурсы для исследования статических и динамических характеристик микрореактора в условиях стимулированной СВЧ-воздействием термокапиллярной конвекции; алгоритм обучения модели изменяющимся в динамике параметрам объекта управления; способ проведения химических процессов в микрореакторах, предусматривающий неравномерный по длине аппарата СВЧ-нагрев компонентов реакции, использованный при проектировании опытной установки для получения этиловых эфиров жирных кислот (ООО «Аркософт»).

Достоверность выносимых на защиту научных положений подтверждается корректным использованием в диссертации современных методов математического моделирования и оптимизации химико-технологических процессов, синтеза автоматических и автоматизированных систем управления – систем с распределенными параметрами, алгоритмами интеллектуализации, использованными при синтезе АСУ, и в целом соответствием полученных результатов известным литературным данным, а также их практической реализацией.

Наряду с отмеченным, диссертационная работа В.А. Боровкова не свободна от замечаний.

Замечания

1. Из схемы экспериментальной установки – рис. 3.1 (диссертация), рис. 3 (автореферат) не ясно, перекрывала ли рупорная антенна всю поверхность микрореактора?

2. В диссертации отсутствует вывод формулы (2.8), являющейся базовой при оценке влияния количественного состава компонентов реакции на эффективность химического процесса в микрореакторе.

3. При описании методики расчета микрореактора нарушена последовательность. Очевидно, сначала следовало находить мощность СВЧ-нагрева в условиях термокапиллярной конвекции, а затем длину микрореактора, а не наоборот.

4. В состав АСУ входят две автоматические системы, работающие поочередно. Не ясно, как система будет реагировать на возмущения, поступившие одновременно.

5. В диссертации сообщается о разработке трёх зарегистрированных программных комплексов для исследования статики и динамики микрореактора и исследования автоматизированной системы управления. Однако, в Приложении Б к диссертации приведен лишь алгоритм обучения модели в самонастраивающейся системе управления.

6. Требуется обоснования использованная в алгоритме обучения модели (глава 5) приближенная процедура вычисления частных производных.

7. Из схемы АСУ (рис. 5.3) не ясно, как происходит изменение задания регулятору 2 после обучения модели. Очевидно, кроме блока 8 подстройки системы в схему АСУ должно входить корректирующее устройство, изменяющее задание регулятору 2.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки рецензируемой работы. Результаты диссертационной работы В.А. Боровкова рекомендуется использовать в научных и научно-исследовательских организациях (РНИЦ «Прикладная химия», РХТУ им. Д.И. Менделеева, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Институт химии СПбГУ и др.), занятых разработкой и внедрением химических процессов в микрореакторах и их автоматизацией.

Диссертация написана хорошим техническим и литературным языком, оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ. Автореферат полностью раскрывает содержание диссертации.

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 интеллектуальных 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).

Отзыв заслушан и одобрен на расширенном заседании кафедр «Машины и аппараты химических производств» и «Системы автоматизации и управление технологическими процессами», протокол № 5 от 11 мая 2023 года.

Заведующий кафедрой
«Машины и аппараты
химических производств»,
д.т.н., профессор



С.И. Поникаров

Доцент кафедры
«Системы автоматизации и
управление технологическими процессами»,
к.т.н.



М.А. Сафин

Поникаров Сергей Иванович: доктор технических наук, 05.17.08, профессор, +7(843)231-41-54, e-mail: PonikarovSI@corp.knrtu.ru

Сафин Марат Абдулбариевич: кандидат технических наук, 05.13.06, 05.17.08, доцент, +7(231-42-72), cmvorkut@mail.ru

Сведения об организации:

Полное наименование организации: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ)

Адрес: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68

Телефон: +7(843) 231-42-16

Сайт организации: <https://www.kstu.ru/>

Электронная почта: office@kstu.ru

С отзывами ведущих
организации ознакомлен
 Боровков В.А.