

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.383.05, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 15.06.2023 г. № 18

О присуждении Боровкову Владимиру Андреевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Методы интенсификации и управление химическим процессом в микрореакторе в условиях стимулированной СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции» по специальностям 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки) и 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) принята к защите 06 апреля 2023 г. диссертационным советом 24.2.383.05 (протокол заседания № 17), созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49, литера А), утвержденным приказом Минобрнауки Российской Федерации № 26/нк от 28.01.2021 г.

Соискатель Боровков Владимир Андреевич, 1995 года рождения.

В 2018 году соискатель окончил магистратуру в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)». В 2022 году окончил очную аспирантуру в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», в настоящее время работает преподавателем Центра среднего профессионального образования при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский

государственный технологический институт (технический университет)», Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре процессов и аппаратов и на кафедре системного анализа и информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук Марков Андрей Викторович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра процессов и аппаратов, доцент.

Научный консультант – доктор технических наук Юленец Юрий Павлович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра системного анализа и информационных технологий, профессор.

Официальные оппоненты:

Гордиенко Мария Геннадьевна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», г. Москва, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, профессор;

Литовка Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, кафедра систем автоматизированной поддержки принятия решений, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, в своем положительном отзыве, подписанным доктором технических наук, заведующим кафедрой машин и аппаратов химических производств, профессором Поникаровым Сергеем Ивановичем, и кандидатом технических наук, доцентом кафедры систем автоматизации и управления технологическими процессами Сафиным Маратом Абдулбариевичем, утвержденном Сафиным Русланом Рушановичем, доктором технических наук, профессором, и.о. проректора по научной работе и инновациям ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» указала, что рассматриваемая диссертация заслуживает положительной оценки. По мнению ведущей организации диссертационное исследование по своему научному и техническому уровню

соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Боровков Владимир Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальностям 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки) и 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки). В работе В.А. Боровкова предложен новый метод интенсификации химических процессов в микрореакторах, основанный на эффекте термокапиллярной конвекции. Влияние на химические процессы в микроканалах нестандартных гидродинамических условий движения жидкостей, вызванных неравномерным нагревом двухфазной системы, ранее не исследовалось. Особые преимущества предложенного метода заключаются в том, что для его реализации использован безынерционный источник тепла – СВЧ-нагрев реакционной смеси в лучевой камере, обеспечивающий условия эффективного управления процессом. Методология создания автоматизированных систем управления химико-технологическими процессами в микрореакторах, протекающих в условиях организованной термоконвективной конвекции, не разработана, что определяет новизну работы как комплексного исследования, выполненного на стыке двух научных специальностей. Результаты диссертации рекомендуется использовать в научных и научно-исследовательских организациях, занятых разработкой и внедрением химических процессов и их автоматизацией: АО «Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)», Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Институт химии Санкт-Петербургского государственного университета.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, по теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах по списку ВАК РФ, 2 статьи в рецензируемом научном журнале, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 свидетельства о регистрации программного ресурса, 3 тезиса докладов на международных и всероссийских конференциях. Авторский вклад соискателя заключается в разработке способа неравномерного нагрева компонентов в микрореакторе с использованием источника СВЧ-энергии, его экспериментальной проверке и объяснении механизма его влияния на интенсивность химического процесса, разработке математических моделей и изучении статических и динамических характеристик микрореактора в двухфазной системе жидкость-жидкость – объекте нового типа, использующего энергию внутренних источников

тепла для создания термокапиллярного конвективного движения, разработке методики расчета микрореактора при дополнительном СВЧ-нагреве, разработке автоматизированной системы управления химическим процессом в микрореакторе (сети микрореакторов) – системе с обучающейся моделью, использующей принцип интеллектуальной поддержки процесса управления на основе встроеного алгоритма обучения модели изменяющимся в динамике параметрам объекта, а также в подготовке текстов публикаций.

Опубликованные работы полностью отражают основные положения диссертационного исследования, в диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые работы автора по теме диссертации:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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. Научный журнал. – 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. Научный журнал. – 2022. – №6. – С. 44–48.

На диссертацию и автореферат отзывы прислали:

1 – Муравьев Александр Геннадьевич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики и автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», (г. Великий Новгород);

2 – Романюк Елена Васильевна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов ФГБОУ ВО «Академия государственной противопожарной службы «Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (г. Москва);

3 – Ковальчук Алексей Владимирович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе ООО «НПП «Энергетические системы»;

4 – Рашковский Павел Валентинович, кандидат технических наук, начальник отдела научного сопровождения проектов АО «Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)»;

5 – Трофимов Николай Валентинович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора ООО «Аккумуляторная компания Бустер»;

6 – Тугов Виталий Валерьевич, доктор технических наук, доцент кафедры управления и информатики в технических системах ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»;

7 – Липин Александр Геннадьевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»;

8 – Лившиц Михаил Юрьевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой управления и системного анализа в теплоэнергетике ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»;

9 – Кичатов Константин Геннадьевич, доцент, кандидат химических наук, доцент кафедры «Нефтехимия и химическая технология» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа;

10 – Самсонов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБ УН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук (г. Санкт-Петербург).

Все отзывы положительные.

В отзывах указывается, что диссертационная работа выполнена по актуальной тематике, отличается научной новизной и практической значимостью, в автореферате полностью отражено содержание исследований, главными научными результатами диссертации являются разработанный и теоретически обоснованный способ интенсификации химических процессов в микрореакторе путем неравномерного нагрева реакционной смеси в лучевой СВЧ-камере и разработанная интеллектуальная автоматизированная система управления химическим процессом в параллельно

функционирующих микрореакторах, автор работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

В отзывах содержатся следующие замечания критического характера:

1. Принималось ли во внимание, что при увеличении доли этилового спирта в смеси (рис. 2) граница раздела будет смещаться к оси трубки, а удельная поверхность раздела фаз будет уменьшаться.

2. Нет пояснений, почему зависимость константы скорости прямой реакции от мощности $k_1'(p)$ выбрана линейной.

3. На странице 9 приведены зависимости $k_1'(\varphi)$ и $k_2'(\varphi)$. Чтобы данные зависимости представляли собой научную и практическую ценность следует привести значения коэффициентов $a_0, a_1, b_0, b_1, b_2, b_3$ и b_4 , которые обычно и получают путем обработки экспериментальных данных.

4. На стр. 15 говорится о зависимости констант скорости от удельной мощности p . Целесообразно было бы пояснить, что такое удельная мощность и чего, а также каким образом уравнение (4) связывает эти параметры, как это следует из текста с отсылкой к зависимости (4).

5. На стр. 16 не вполне ясно значение выражения «Колебание параметра φ вызывает возмущение по начальной концентрации $c_{АН...}$ » с учетом того, что φ – это соотношение компонентов в смеси, а $c_{АН}$ – это начальная концентрация масла в данной смеси.

6. Согласно описанию в автореферате система на рис. 7 представляет собой замкнутый контур управления, что не соответствует изображению.

7. Не хватает пояснения, что из себя представляет модель объекта (рис. 8), особенно с учетом того, что диссертация защищается по двум специальностям, в которых объекты разные.

8. Следовало бы подробнее остановиться на результатах практического внедрения работы в производство (возможно, этот вопрос освещен в тексте диссертации), а также оформить результаты работы в виде патента.

9. Приведенные зависимости $k_1'(\varphi)$ и $k_2'(\varphi)$ получены в результате обработки экспериментальных данных конкретного процесса, проводимого в конкретном микрореакторе. Возможность масштабирования, либо переноса полученных результатов на реактора с другой гидродинамикой в автореферате не приводится.

10. Из автореферата и приведенной структурной схемы системы управления совершенно не понятен алгоритм адаптационного управления сетью микрореакторов, на что автор претендует в разделе «Цели и задачи работы».

11. Следовало бы, по-моему, привести хотя бы ориентировочную оценку целесообразности (границ применения) использования столь сложной в реализации и, соответственно, затратной системы для управления химическими процессами.

12. Не указаны возможные сферы применения СВЧ-нагрева в химических процессах. Работа базируется на конкретном экспериментальном процессе и оканчивается созданием лабораторной установки.

13. «Изучение динамических характеристик микрореактора с ...» не является научной новизной работы.

14. Не раскрыто, каким пунктам паспорта научных специальностей соответствует содержание диссертации и не представлена информация по актам внедрения.

15. Из содержания автореферата не ясно, как влияет изменение расхода смеси на процесс переэтерификации при СВЧ-нагреве.

16. В автореферате на стр. 18 представлена структурная схема самонастраивающейся системы управления химическим процессом, которая имеет вход, но нет выхода, система замкнута.

17. Автором не предпринята попытка обобщить полученный на конкретном примере результат, а именно сформулировать, какие параметры процесса, свойства жидкостей, условия позволяют реализовать режим термокапиллярной конвекции.

18. Если доказано – рис. 2, что избыток этилового спирта в смеси обеспечивает ускорение процесса, то почему при использовании СВЧ-нагрева соотношение масло-спирт принято равным стехиометрическому?

19. Не приведена численная оценка членов полного уравнения динамики объекта. В частности, не указано численное значение эффективной константы скорости обратной реакции k_2' в сопоставлении с численным значением эффективной константы скорости прямой реакции k_1' .

20. При синтезе систем управления микрореактором (рис. 7, рис. 8) не уточняется способ измерения концентрации ключевого компонента.

21. В автореферате отсутствует описание алгоритма обучения модели, который входит в состав построенной автоматизированной системы управления микрореактором.

22. Недостаточно подробно описана конфигурация системы СВЧ-нагрева: не приводится взаимное расположение источника СВЧ-излучения и капилляра, не приводятся данные об оценке распределения электромагнитного поля в этой системе.

По этой причине возникают трудности при оценке распределения объемной плотности мощности вдоль капилляра и соответствующего ему градиента температуры.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в рассматриваемых отраслях науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью оценить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан научно обоснованный способ интенсификации химических процессов в микрореакторе неравномерным нагревом реакционной смеси в лучевой СВЧ-камере;

предложена математическая модель химического процесса в микрореакторе, описывающая распределение концентрации и температуры целевого компонента по длине микрореактора, учитывающая влияние на его интенсивность стимулированного СВЧ-воздействием эффекта термокапиллярной конвекции;

доказан механизм интенсифицирующего воздействия на химический процесс в двухфазной системе жидкость-жидкость неравномерного по длине микрореактора СВЧ-нагрева реакционной смеси, заключающийся в развитии дополнительной движущей силы термокапиллярной конвекции; одновременно СВЧ-нагрев как безынерционный источник тепла обеспечивает возможность эффективного управления и автоматизации химического процесса в микрореакторе;

введен новый термин: «микрореактор при дополнительном СВЧ-нагреве» как объект нового типа, реализующий механизм термокапиллярной конвекции и формирующий предпосылки эффективного управления химическим процессом.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, с использованием численных расчетов, существенное влияние скоростей термокапиллярного движения на развитие на поверхности раздела фаз интенсивного вихревого движения;

применительно к проблематике диссертации результативно, с получением обладающих новизной результатов использован способ интенсификации химических процессов в микрореакторе путем неравномерного нагрева реакционной смеси в лучевой СВЧ-камере, что позволило разработать интеллектуальную автоматизированную систему управления химическим процессом в параллельно функционирующих микрореакторах, обеспечивающую компенсацию

неконтролируемых возмущений, в том числе при изменяющихся динамических характеристиках объекта;

изложены теоретические и экспериментальные результаты анализа статистики и динамики микрореактора с дополнительным внутренним источником тепла – объекта с распределенными параметрами нового типа, реализующего механизм термокапиллярной конвекции;

раскрыты особенности стимулированного СВЧ-нагревом реакционной смеси конвективного движения системы подсолнечное масло-этанол в микроканале под действием неравномерного по длине градиента температур;

изучено влияние удельной мощности внутренних источников тепла на величину эффективной константы скорости реакции переэтерификации подсолнечного масла этанолом, определяющей интенсивность химического процесса в микрореакторе; одновременно установлено, что удельная мощность внутренних источников тепла представляет собой дополнительный безынерционный и, следовательно, эффективный управляющий параметр химического процесса в микрореакторе;

проведена модернизация существующих математических моделей химических процессов в микрореакторах введением в рассмотрение найденной зависимости эффективной, учитывающей вклад массопередачи, константы скорости реакции от удельной мощности внутренних источников тепла, что позволило выбрать безынерционный канал управления.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что

разработана и внедрена на опытно-лабораторном уровне установка для получения этиловых эфиров жирных кислот,

определены перспективы использования разработанного электрофизического способа воздействия на двухфазную систему жидкость-жидкость и автоматизированной системы для управления микрореактором в процессах синтеза органических веществ,

представлены практические рекомендации по проведению химического процесса в микрореакторе в условиях стимулированной неравномерным СВЧ-нагревом термокапиллярной конвекции, включающие методику расчета микрореактора, структурные схемы автоматической и автоматизированной систем управления объектом при дополнительном внутреннем источнике тепла.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

достоверность результатов работы подтверждается корректным использованием методов математического и компьютерного моделирования и оптимизации химико-технологических процессов, синтеза автоматизированных систем управления, алгоритмов интеллектуализации при построении АСУ, а также согласованностью полученных экспериментальных данных процесса переэтерификации подсолнечного масла этанолом при различном мольном отношении компонентов, их физико-химической интерпретацией и сопоставлением с известными из литературы данными;

теория базируется на достоверных и проверяемых данных и соответствует современным представлениям, принятым в научно-технической литературе по теме диссертации;

идея базируется на критическом анализе отечественных и зарубежных литературных источников по тематике исследования, обобщении и развитии теории и практики проведения жидкофазных процессов в микрореакторах, включая методы их автоматизации, и примененном впервые в микрореакторах электрофизическом способе воздействия на поверхностные свойства жидкостей;

использованы известные и соответствующие решаемым задачам методы обработки экспериментальных данных, методы теоретического анализа химических и массообменных процессов, методы синтеза автоматизированных систем управления;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов исследования химического процесса с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;

использованы современные методики сбора и анализа исходной информации, методы аналитического и численного решения дифференциальных уравнений, синтеза автоматизированных систем управления, компьютерные программы MathCad, MATLAB, Simulink, Python 3, а также стандартизированные методики измерения.

Личный вклад соискателя состоит в проведении поиска и анализе литературы по тематике диссертации, составлении плана исследования. С участием соискателя выполнен комплекс экспериментальных исследований химического процесса, разработан способ неравномерного СВЧ-нагрева компонентов реакции в микрореакторе и объяснен механизм его влияния на интенсивность процесса, исследованы статические и динамические характеристики микрореактора – объекта нового типа, использующего энергию внутренних источников тепла для создания дополнительной движущей силы термокапиллярной конвекции, разработана и исследована интеллектуальная автоматизированная система управления,

осуществлена подготовка публикаций по теме диссертации. Основная часть работы выполнена автором самостоятельно.

В ходе защиты диссертации высказаны следующие критические замечания:

1. У вас в докладе прозвучало, что разработана методика расчета процесса, но на слайдах Вы её не приводите.

2. Какими были исходные данные в методике?

3. Скажите, пожалуйста, в автореферате и диссертации сказано, что результаты работы использованы на практике. Для каких продуктов конкретно и что практически использовано?

4. То есть вы хотите сказать, что в установке, рекомендованной к внедрению, производительность была небольшой?

5. Еще вопрос такой. Скажите, пожалуйста, вот мы всегда стремимся для увеличения скорости (интенсивности) процесса увеличивать поверхность контакта фаз. А у Вас на слайде 25 масло движется по центру струйкой, а спирт – по периферии. Почему Вы остановились на такой конфигурации потоков? Почему не рассматривали диспергирование потоков, то есть их разбиение на мелкие капли, таким образом увеличивая поверхность раздела фаз, как это сделано в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами, которыми занимается Руфат Шовкетович Абиев?

6. Я спрашивал о физике процесса, а не о модели.

7. Владимир Андреевич, у меня тоже вопрос по режиму движения потоков в каналах. Когда мы Вас на предзащите слушали, то вы говорили, что действительно одна из фаз диспергирована в другой. Вы даже отвечали на вопрос о размере капель. Сейчас мы смотрим на картинку, и режим движения совсем другой. Что изменилось?

8. А как на самом деле движутся частицы в аппарате? Так, как на картинке у Вас или так, как Вы говорили на предзащите? Какая картина движения показана на слайде 25?

9. Я помню, что в Вашей установке стенки микроканала были непрозрачными. То есть вы, получается, наугад берете: то капельки, то слоистое течение. А какая реальная картина?

10. Вы сказали в докладе, что течение жидкостей ламинарное и на этом основании предложили модель идеального вытеснения. Это, вообще, противоречит одно другому, потому что при ламинарном течении профиль параболический, который никак не может соответствовать этому режиму идеального вытеснения. Мне кажется, это сильным допущением. Что можете сказать по данному поводу?

11. Откройте слайд 15. Здесь если обратить внимание на кривые 3 и 4, такое впечатление, что при небольшом изменении доли ϕ скачкообразно происходит изменение эффективности. Чем Вы это можете объяснить?

12. Вопрос о значимости вот этих ϕ . Почему не делали расчет воспроизводимости, адекватности вместо того, чтобы рассуждать о том, что больше, что меньше?

13. Откройте, пожалуйста, слайд 11. Мне кажется, Вы очень упростили схему реакции. Вероятность возникновения тримолекулярных реакций очень мала. Скорее всего, реакции идут параллельно. Сначала идет одна, потом вторая. У Вас слишком просто. Вы также ничего не сказали о том, как вы определяли концентрацию? В смеси не так просто выделить отдельные компоненты.

14. Реакции переэтерификации никогда не доходят до конца. В них остаются частицы веществ. Их, наверное, надо отделять друг от друга?

15. Можете ли Вы рассчитать, сколько килограммов, граммов, миллилитров продукта Вы получите на выходе аппарата через 1-2 часа при взятии определенного количества начальных веществ?

16. Почему Вы не проводили такой расчет?

17. Для каких процессов можно использовать предложенную вами модель?

18. Процесс получения биодизельного топлива достаточно важен в промышленности. Не ясным остается, как Ваше исследование способствует улучшению этого процесса.

19. На мой взгляд, Вы усложнили себе жизнь, выбрав в качестве объекта исследования подсолнечное масло. Прокомментирую свой тезис: дело в том, что растительное масло это смесь нескольких жиров. Оно состоит из компонентов C_{14} , C_{16} , C_{18} и т.д. Есть предельные и непредельные карбоновые кислоты, образовавшие эти жиры. С этой точки зрения объект очень сложен, а Вы упрощаете эту модель до очень, не побоюсь этого слова, примитивной схемы. Задам следующий вопрос. В чем состоит особенность проведения реакций переэтерификации и этерификации в промышленности?

20. Грустно, что Вы не рассматривали особенности этих процессов. Объясню в чем их особенности. Дело в том, что такие реакции ведут при температуре 65 °C. В таких условиях ни о каком массообмене говорить не приходится, можно лишь говорить о массопереносе. Важным для рассматриваемой реакции является смещение равновесия реакции вправо, то есть необходимо перенести тот или иной компонент из зоны реакции в зону «нереакции». Это достигается путем повышения температуры,

изменения давления, внесения растворителей и т.д. Это сложная система. Поэтому в той записи, что Вы написали, должно быть как минимум уравнение Фика, уравнение диффузии. В реакциях такого вида используется, как правило, реактор идеального смешения.

21. Поскольку Вы представляете химический эксперимент, то неплохо было бы дать иллюстрацию стенда и пояснить, что поступало на вход?

22. Какой параметр Вы контролируете при рассмотрении задачи автоматизации химического процесса?

23. Как измеряли концентрацию масла?

24. В автореферате на странице 4 написано, что на границе раздела фаз происходит вихревое движение. Вы можете показать фотографии, как выглядит это вихревое движение? Как определили, что там вихревое движение?

25. Вы в своей работе указываете скорость течения жидкости $v = 2,1$ мм/с. Только одну скорость рассматривали? Это скорость течения какой жидкости?

26. А как Вы учитывали изменение параметра ϕ ? И как добивались поддержания постоянной скорости потока?

27. Процесс сложен не только с точки зрения химизма процесса, но и с точки зрения термодинамики. На вход поступают две жидкости – спирт и масло, в процессе образуется глицерин, который обладает вязкостью в 1000 раз больше. Может быть изменяется режим процесса? Как Вы это наблюдали?

28. Из какого материала был сделан микрореактор?

29. Теперь по поводу СВЧ-воздействия. Какова длина ЭМ-волны и образовывались ли стоячие волны?

30. А какой диаметр микроканалов?

31. Это половина миллиметра. Длина волны составляет порядка нескольких сантиметров и у Вас оказывается, что она значительно больше диаметра микрореактора. Возникает вопрос, сколько же там пучности будет на этой длине волны? И как эта пучность отразится на пути движения жидкостей?

32. Откройте 23 слайд. У Вас на графиках все точки имеют одинаковый вид. Они все к одному массиву данных относятся или к разным? Можно было бы их обозначить по-разному.

33. Какая у Вас продолжительность реакции?

34. Порядка 12–15 минут. Я хочу сказать, что это очень много. Мы у себя в резонансном пульсационном аппарате получаем этот продукт за 3 минуты.

35. Если речь идет об интенсификации процесса, то Вы должны как минимум иметь две вещи. Первая это полезный эффект и второе это какие-то затраты, в том числе энергетические. Скажем, выбрали определенный аппарат, применили метод и они вместе дают такой-то значимый эффект, что его можно применять на практике. Делали ли Вы такую оценку?

36. Поговорим о производительности аппарата. Вы работаете с одним каналом. А если говорить о возможностях дальнейшего применения результатов, в чем Вы их видите? Вам наверняка нужно обеспечить определенный тоннаж производства?

37. Вопрос по слайду 25. Как Вы оцениваете скорость потока в ядре и в пленке? Она ведь неодинакова?

38. Такой вопрос, вот у Вас есть расход реагентов и мощность СВЧ-излучения. Найдены ли оптимальные значения этих параметров?

39. Слайд 2 откройте, пожалуйста. На нем представлены различные виды микрореакторов. А к какому именно микрореактору применима Ваша технология, Ваш подход?

40. Какую конструкцию имеет микрореактор? Дело в том, что существуют микрореакторы различной конструкции. Они могут быть с закручивающимися каналами, совершенно разного внутреннего размера и с изменением этих размеров по длине реактора. Как соотносятся результаты Ваших исследований с конструкциями различных типов микрореакторов?

41. То есть понадобится проводить дополнительное исследование?

42. Исходя из Ваших рисунков, Вы работали с лабораторными микрореакторами. Для промышленного применения эти микрореакторы компонуются друг с другом и реализуются в виде больших установок, сохраняющих свойства микрореакторов. Как применить результаты исследования в случае рассмотрения промышленных микрореакторов?

43. Как технически будет реализован СВЧ-нагрев в случае использования аппарата 2 метра в высоту и 1 метр в длину?

44. Вопрос касается специальности 2.3.3 и тех положений, которые Вы выносите на защиту для данного класса объектов. Вы выносите на защиту математические модели статики и динамики, алгоритмы управления и алгоритмы обучения модели, то есть интеллектуализации. Это действительно соответствует паспорту специальности. Дайте, пожалуйста, характеристику вашего объекта исследования: что нового Вы предложили в предложенной Вами модели, какие упрощения сделали, допущения, как сформулировали целевую функцию? Какие средства позволили Вам решить сложную

задачу управления? Что включает в себя Ваша модель для достижения целей управления?

45. Правильно ли я понимаю, что предложенная Вами модель объекта управления, построенная на базе передаточных функций и на тех допущениях, которые адекватно описывают объект, позволили Вам максимизировать выход продукта, но при этом обеспечить безынерционность регулирования?

46. В научной специальности 2.3.3 есть пункт, касающийся алгоритма управления. Какой новизной обладает предложенный Вами алгоритм управления? Можно ли особенность алгоритма управления распространить на класс объектов, описывающих химические процессы?

47. В продолжение вопроса профессора Потехина. Любое обучение построено на измерении. На основе каких измеряемых показателей качества построена предложенная система управления?

48. Вы выносите на защиту интеллектуальную систему. Очень смело, знаете ли. Здесь присутствует профессор по интеллектуальным алгоритмам управления, профессор Уткин. Скажите, пожалуйста, в чем состоит интеллектуальность? Какие технологии искусственного интеллекта Вы используете в работе?

49. Зачем используете избыток этанола в смеси?

50. Если достигается более высокая производительность Вашего устройства, то зачем использовать СВЧ-нагрев?

51. Скажите, реакция переэтерификации экзотермическая или эндотермическая?

52. Учитываете ли Вы тепловой эффект реакции?

53. Если экзотермический эффект не учитывался, то скорость процесса определяется лишь гидродинамическими условиями? И больше никакие факторы не учитывались?

Соискатель В.А. Боровков согласился с замечаниями и ответил на задаваемые ему вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Да, действительно, методика не включена в презентацию. Презентация и так получилась очень большая. Однако в диссертации методика расчета микрореактора приведена в главе 3.

2. Исходными данными в методике являлись физические и электрофизические свойства веществ, начальные концентрации компонентов A и B , количество катализатора, выходная концентрация компонента D .

3. Результаты диссертации использованы при проектировании опытной установки для получения этиловых эфиров жирных кислот. В качестве продуктов выступали вещества для реакции переэтерификации – подсолнечное масло и этанол.

4. Да, действительно рекомендована к использованию лабораторная установка небольшой производительности в виде микрореактора с дополнительным СВЧ-нагревом.

5. Нам показалось, что такая картина наиболее точно описывает протекание химического процесса в условиях термокапиллярной конвекции. Именно такие модельные представления мы приняли за основу.

6. При оценке скорости термокапиллярного движения необходимо было задать картину движения жидкостей в микрореакторе.

7. Мы применили другой подход. Окончательно остановились на нём.

8. Когда процесс осуществляется при избытке этанола в смеси, то можно предположить, что из-за уменьшения межфазного поверхностного натяжения капли масла дробятся на более мелкие частицы. При использовании неравномерного СВЧ-нагрева межфазное поверхностное натяжение уменьшается по длине. Но для оценки скорости термокапиллярного движения необходимо было исходить из определенной гидродинамической картины движения жидкостей. Фотография движения потоков взята нами из литературы, в частности из статьи французских исследователей – Ришара и соавторов.

9. При оценке скоростей термокапиллярного движения исходили из фотографии потоков на слайде 25. Реальную картину гидродинамического движения мы не исследовали. Фотографирование движущихся потоков в микроканале мы не проводили.

10. Наверное я не все сказал. При большом соотношении длины к диаметру аппарата режим движения потоков всегда принимается модель идеального вытеснения. В аппарате идеального вытеснения реакционная смесь движется от входа к выходу. При этом в ней происходит химическая реакция. Время реакции пропорционально пути, пройденному потоком.

11. Здесь объяснение может быть найдено в следующем. Значения параметра ϕ на кривых 1, 2 и 3 находятся ближе к стехиометрическому соотношению. По этой причине кривые дольше нарастают, если так можно сказать. А вот кривая под номером 4 более резкая, реакция происходит быстрее за счет избытка этанола.

12. Расчет адекватности математической модели выполнялся. На слайдах показано сопоставление расчета с экспериментами. По этим данным можно говорить о том, что модель в достаточной степени соответствует эксперименту.

13. Что касается схемы реакции. Использовалась упрощенная схема реакции. Реакция состоит из трех последовательных реакций, идущих друг за другом. Здесь же принято упрощение для проведения дальнейшего моделирования процесса. Реакций 4-го порядка в природе не существует. Да даже и реакций 3-го порядка не существует. Касательно измерения концентраций следует уточнить, о какой части работы мы говорим. При создании автоматизированной системы управления концентрацию можно измерять только непрерывным методом. Для реализации в автоматизированной системе управления может быть использован ультразвуковой метод измерения концентраций с пьезодатчиком, который погружается в контролируемую среду. В качестве чувствительного пьезоэлемента в настоящее время используют кристаллы ниобата лития. При проведении экспериментов нами использовался хроматографический метод анализа состава смеси на приборе системы Waters.

14. Концентрацию этиловых эфиров жирных кислот определяли методом жидкостной хроматографии без предварительного разделения.

15. Такие расчеты я не делал.

16. Мы занимались исследованием химического процесса в конкретном аппарате с целью его интенсификации. Для достижения поставленной цели применялся в частности СВЧ-нагрев реакционной смеси, что и показано на слайде 18. Пример расчета микрореактора приведен в диссертации.

17. Математическую модель статики можно использовать для описания химических и биохимических процессов. А также процессов синтеза органических веществ в двухфазных системах жидкость-жидкость, протекающих в микрореакторах. Диаметр канала – до 2 мм. Дополнительное воздействие на реакционную смесь СВЧ-излучения стимулирует развитие продольного градиента температуры. Возникает дополнительная движущая сила термокапиллярной конвекции, что приводит к повышению производительности аппарата.

Конечно, использовать преимущества СВЧ-нагрева можно только в том случае, если хотя бы один компонент реакции представляет собой полярную жидкость с большими диэлектрическими потерями. Если жидкости неполярны, то СВЧ-нагрев неэффективен.

18. Применение дополнительного СВЧ-нагрева смеси приводит к значительной интенсификации процесса. Вместо традиционных способов повышения, основанных

на применении интенсивных гидродинамических режимов в данной работе применен неравномерный по длине СВЧ-нагрев реагентов, который приводит к интенсивному вихревому движению на поверхности раздела фаз.

19. К сожалению, не готов ответить на этот вопрос поскольку в работе не затрагивались особенности процессов этерификации и переэтерификации. Акцент был сделан на математическом моделировании процесса в аппарате и на разработке электрофизического способа воздействия на процесс, который ослабляет тормозящую роль массообмена. На этой основе далее решалась задача построения автоматизированной системы управления.

20. В реакциях, возможно. Но мы рассматривали проведение процесса в аппарате. Массообмен или иначе массоперенос является мешающим фактором, тормозящим химическую реакцию. Ослабление влияния массопереноса проявляется в увеличении объемного коэффициента массопередачи «эта штрих» и эффективной константы скорости «к один штрих» – уравнение (2) на слайде 11.

21. На схеме установки – слайд 18 – показаны микронасосы, подающие реагенты на вход микрореактора через Т-образный смеситель.

22. В качестве основного контролируемого параметра в схеме АСУ выступала выходная концентрация подсолнечного масла в смеси – компонента А.

23. В схеме АСУ – слайд 41 – предусмотрено, что концентрация биодизельного топлива измеряется непрерывно ультразвуковым методом. Чувствительный элемент – пьезодатчик на основе кристаллов ниобата лития.

Пересчет концентрации c_D в концентрацию c_A осуществляется по простой формуле – слайд 12.

24. Нет, микрофотографий вихревого движения мы не делали. Достигнутый за счет неравномерного нагрева жидкостей в капилляре эффект проявляет себя в увеличении производительности микрореактора в 2 и более раза. Этот эффект мы связываем с конвекцией Марангони, для чего и оценивалась скорость термокапиллярного движения.

25. Это некоторая средняя – приведенная – скорость двухфазного потока. Она определялась из объемных расходов реагентов.

26. Изменение параметра ϕ учитывалось через отношение объемных расходов по формуле, приведенной на слайде 33.

27. Видеосъемку в микрореакторе мы не проводили. Процесс оценивали интегрально – по результату на выходе. Лабораторный микрореактор изготовлен из фторопласта. Микрореактор промышленного образца изготовлен из стекла.

28. Лабораторный микрореактор изготовлен из фторопласта. Микрореактор промышленного образца изготовлен из стекла.

29. Длина электромагнитной волны стандартная для СВЧ-генераторов и составляет 12,2 см.

30. Диаметр микроканалов 500 микрометров.

31. Стоячие волны не образуются, так как ЭМ-волна частично поглощается реакционной смесью и далее без отражения проходит в нижнюю часть установки, где затухает на поглощающей нагрузке – емкости с водой.

32. Здесь стоит пояснить, что в экспериментах использовались различные длины микрореакторов. 10 точек соответствуют 10 различным по длине микрореакторам. Конечно, точки относятся к разным кривым.

33. 600–1000 секунд.

34. Реакцию можно проводить не до конца, а останавливать её спустя несколько минут.

35. Есть оценка производительности аппарата в разных режимах. Экономическую оценку мы не делали.

36. Можно использовать сеть параллельно работающих микрореакторов одинаковой конструкции.

37. Мы оценивали приведенную скорость потока.

38. Такой вопрос не изучался. Для эффективного СВЧ-нагрева главное, чтобы жидкость обладала большими диэлектрическими потерями в СВЧ-диапазоне.

39. К микрореактору первого типа, расположенному в верхнем левом углу, оранжевая картинка.

40. Конструкция микрореактора приведена на дополнительном слайде. В распечатку она не попала, но я могу её показать. Это хорошее подспорье для проведения дальнейших исследований.

41. Перенести результаты напрямую нельзя. Возможно сделать некоторое приближение с учетом геометрии каналов. Предполагаю, что интенсивность процесса окажется выше при использовании закручивающихся каналов.

42. Промышленный аппарат надо рассматривать как сеть микрореакторов, которые представляют собой отдельные объекты, исследование которых проведено в работе.

43. Сеть микрореакторов помещается в закрытую СВЧ-камеру с рупорным излучателем. Общая площадь сети микрореакторов должна быть несколько меньше площади раскрыва рупорного излучателя.

44. Основным научным результатом работы является интенсификация химического процесса в микрореакторе, которая обеспечивается применением неравномерного по длине аппарата СВЧ-нагрева реакционной смеси в движущемся потоке. Одновременно СВЧ-нагрев позволил разработать эффективную систему автоматизированного управления, так как использован безынерционный канал управления.

45. Да, действительно это так.

46. Новизна автоматизированной системы управления заключается в использовании в её составе обучающейся модели. Система является самонастраивающейся. В неё заложен алгоритм обучения, который подстраивает параметры модели в случае изменения во времени параметров объекта.

47. Управление построено по каналу $c_{AK} - p$ (конечная концентрация компонента А – удельная мощность СВЧ-нагрева), где в качестве измеряемого параметра выступает конечная концентрация компонента А. Есть еще второй канал управления – по возмущению.

48. Прежде всего это алгоритм обучения модели, то есть процедура подстройки параметров модели под изменяющиеся в динамике параметры объекта. В этом заключается и новизна системы. Предложена также вычислительная процедура поиска минимума рассогласования между выходными сигналами объекта и модели.

49. Избыток этанола приводит к лучшему смачиванию частиц масла и тем самым увеличивает поверхность раздела фаз.

50. В первой части работы мы использовали избыток этанола в смеси, учитывая, что этанол более дешевый компонент. Полученные на этом этапе результаты позволили оценить механизм влияния межфазного поверхностного натяжения на интенсивность процесса. При преобладании доли этанола в смеси межфазное поверхностное натяжение уменьшается. Однако, при избытке этанола излишки этанола потребуется отделять от этиловых эфиров. По этой причине в дальнейшем исследовании исходные компоненты брали в стехиометрическом соотношении: $\varphi = 3$ и применили метод неравномерного СВЧ-нагрева.

51. Слабая экзотермическая с малым выделением тепла.

52. Небольшое выделение тепла не учитывалось.

53. Новые гидродинамические условия, вызванные термокапиллярной конвекцией, обеспечили интенсификацию процесса. Но математическое описание и расчет процесса учитывают влияние на химическую реакцию массопереноса.

Диссертация Боровкова Владимира Андреевича представляет законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленных пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (с последующими изменениями).

На заседании 15 июня 2023 года диссертационный совет принял решение: за новые научно обоснованные технические и технологические решения в области разработки методов и способов интенсификации химических процессов в микрореакторах с помощью физических воздействий, разработки научных основ и методов построения интеллектуальных систем управления, имеющие существенное значение для развития теории и практики жидкофазных химико-технологических процессов, присудить Боровкову Владимиру Андреевичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки), входящих в состав совета, 3 доктора наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), участвовавших в заседании, из 22 человек, дополнительно введены на разовую защиту 3 человека, проголосовали: за – 18, против – 2, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

15 июня 2023 года

Мазур Андрей Семёнович

Клементьев Василий Николаевич

