

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и цифровому развитию
МГТУ им. Н. Э. Баумана
доктор экономических наук, профессор

Дроговоз П.А

2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на диссертационную работу Пхью Вэй Лин «Моделирование тепло- и массопереноса и фазовых переходов в высокодисперсных системах при воздействии электромагнитного поля», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность темы исследования.

Диссертационная работа Пхью Вэй Лин посвящена математическому моделированию нелинейных процессов тепло- и массопереноса и фазовых переходов первого рода, происходящих в мезо- и наносистемах под действием электромагнитных полей. В настоящее время высокодисперсные структуры приобретают очень широкое распространение в различных областях техники, технологии и других. Поэтому возрастает число работ, посвящённое механическим, физико-химическим и другим свойствам таких структур. Вместе с тем явления и процессы в таких системах являются достаточно сложными ввиду того, что их характеристики непосредственно связаны с малостью размеров. Сложность усугубляется для процессов, происходящих в условиях внешних воздействий. В связи с этим математическое описание процессов переноса и фазовых переходов в этих системах требует привлечения современных математических методов, позволяющих их разностороннее рассмотрение. В диссертации исследуются процессы тепло- и массопереноса и фазового перехода первого рода с использованием различных современных методов математического моделирования, учитывается нелинейность процессов и воздействующего поля, предложен численно-аналитический метод моделирования и алгоритмы.

Поэтому тема диссертационного исследования является актуальной.

Научная новизна исследования.

-Разработана математическая модель для определения условий возникновения электромагнитного резонанса в оптически нелинейных системах, диэлектрическая проницаемость которых зависит от поля: для двухслойных сферических частиц и двух близко расположенных дисперсных частиц.

-Выявлены закономерности и особенности индуцированного теплопереноса в двухслойных мезо- и наносистемах, а также в системе с двумя сферическими частицами, взвешенными в континуальной среде, с различными оптическими и теплофизическими свойствами. В двухслойной сферической частице выявлены закономерности и особенности массопереноса вида «диффузия-реакция», обусловленного нагреванием вследствие воздействия электромагнитного поля.

-Разработан численно-аналитический метод определения температуры в дисперсной системе в нелинейном электромагнитном поле с выделением резонансной гармоника.

-Разработана модификация алгоритма Хошена–Копельмана, позволяющая проводить вычисления для моделирования фазовых переходов первого рода в высокодисперсных системах в приповерхностном слое.

-Предложена модель фазового перехода для системы «жидкость-газ» в виде древовидных графов состояний, зависящих от температуры на поверхности испарения и для газовой фазы вблизи поверхности фазового перехода. С использованием построенной модели предложен подход применения р-адического анализа и модели Поттса.

Значимость для науки и практической деятельности.

Теоретическая значимость заключается в предложении новых моделей для описания фазовых переходов на границе жидкости и газа, а также в предложенном методе определения температуры для мезо- и наносистем, находящихся в электромагнитном поле. Разработанные модели, метод и алгоритмы могут формировать основу для фундаментальных исследований более сложных дисперсных систем, например, для коллективов неоднородных частиц с нелинейными свойствами.

Полученные результаты имеют практическую значимость. Разработанные математические модели, алгоритмы и программный комплекс могут быть использованы в непосредственных расчётах для высокодисперсных структур, находящихся в поле электромагнитного излучения, а также для управления процессами переноса в системах с мезо- и наночастицами в жидких и газовых средах с применением электромагнитных источников. Исследуемая

проблема имеет важное прикладное значение для таких отраслей народного хозяйства, как приборостроение, нанотехнологии и другие. Полученные результаты также могут быть внедрены в учебный процесс на уровнях бакалавров и магистров (в диссертации имеется акт о внедрении).

Структура и содержание работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 213 наименований, пяти приложений, содержит 3 таблицы, 27 рисунков. Полный объем диссертации составляет 214 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность темы, определена цель и указаны решаемые задачи, сформулирована научная новизна проведенного исследования, раскрыта теоретическая и практическая значимость работы, приведены методы исследования, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Моделирование фазовых переходов «жидкость-газ» и массопереноса в неоднородных системах» сделан обзор по литературе, посвящённой процессам переноса и фазовых переходов в дисперсных системах. Подробно рассмотрены такие типовые для дисперсных сред системы как капли и капилляры. Уделено внимание моделированию испарения жидких смесей в пористых телах, ряду аспектов, возникающих при решении задач типа «реакция – диффузия». В конце главы делается обоснованный вывод об актуальности математического моделирования в области тепломассопереноса и фазовых переходов в дисперсных средах ввиду многоплановости проблем, возникающих в этой сфере (стр. 38).

Во второй главе «Математические методы исследования фазовых переходов» рассмотрен большой спектр современных математических методов, которые применяются или могут быть применены для корректного описания закономерностей, имеющих место для процессов фазовых переходов и тепло- и массопереноса. Рассмотрены методы моделирования с использованием нелинейных динамических систем, моделирование хаоса в гамильтоновых системах. Рассмотрены основные понятия, применяемые при моделировании с использованием p -адического анализа. Рассмотрены основные положения и некоторые подходы теории перколяции, применяемые при моделировании процессов переноса в неупорядоченных средах. Такие подходы позволяют рассмотреть исследуемые в диссертации процессы с различных позиций.

На основании сделанного обзора автором делается вывод о необходимости интеграции различных подходов для анализа процессов переноса с учётом фазовых переходов в высокодисперсных системах в условиях внешних воздействий (стр. 76).

В третьей главе «Взаимодействие электромагнитных полей с нано- и мезосистемами и индуцированные эффекты» автором получены оригинальные результаты. С использованием нелинейных уравнений Максвелла и квадратичной зависимости диэлектрической проницаемости от электрического вектора найдены условия электромагнитного резонанса. Рассмотрено возникновение электромагнитного резонанса в двухслойной сферической частице и для двух близко расположенных частиц. Для двух частиц показана возможность возникновения резонанса, обусловленного взаимодействием между частицами: возникновение резонанса в одной из частиц приводит к его возникновению и в другой частице. Найдены плотности тепловых источников, обусловленные поглощением электромагнитной волны. Решены уравнения теплопроводности с найденными тепловыми источниками и получены различные реализации температурных полей в зависимости от температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности от температуры в частицах и окружающей среде. В двухслойной частице рассмотрена задача «реакция -диффузия» с коэффициентами, зависящими от температуры и соответственно от параметра нелинейности в задаче электродинамики. Показана возможность возникновения барьерного эффекта для концентрации вблизи границы перехода между внутренним и внешним слоями сферы. С использованием полученных решений автором разработан численно-аналитический метод для определения температуры дисперсной системы, находящейся под действием электромагнитного поля, особенностью которого является выделение резонансной гармоники. Проведены вычислительные эксперименты с использованием программного комплекса, разработанного диссертантом (подробно описан в 5 главе).

В четвертой главе «Моделирование фазовых переходов с использованием методов теории перколяции и р-адического анализа» получены новые результаты по моделированию фазовых переходов первого рода для высокодисперсных систем. Температура, при которой происходит переход определяется из решения уравнения теплопроводности с тепловым источником электромагнитной природы. Для определения положения взаимодействующих молекул на поверхности жидкости используется потенциал Бакингема (стр. 138). Для определения структуры приповерхностного слоя в газовой фазе вблизи поверхности испаряющегося вещества автором разработана модель перколяционного алгоритма Хошена – Копельмана. В алгоритм введено число Кнудсена, рассматриваются 3 вида ячеек: молекулы испаряющегося вещества, вещества атмосферы и пустые ячейки. Вероятности заполнения определяются с учётом функции распределения, зависящей от температуры.

Для определения более точной информации структуры приповерхностного слоя автор рассматривает возможности р – адического анализа, т.к. с его помощью можно отличить объекты, хотя и их предельные значения вероятностей будут одинаковы. Это особенно интересно для быстрых молекул, т.к. их относительно мало. Автор ссылается на работу Хренникова по р- адической теории вероятностей, а также моделирует состояния системы в зависимости от изменяющейся температуры в жидкой и газовой фазах. Соответствующий граф представляет собой дерево, что является достаточно логичным и позволяет рассмотреть гамильтониан системы Поттса и определить квазигиббсовскую меру для выбранных графов.

В пятой главе «Алгоритмы и комплекс программ» приведены блок-схемы разработанных алгоритмов, описан разработанный комплекс программ. MATLAB коды для модификации расчётов по тепло-и массопереносу приведены в **Приложении В**. MATLAB коды для модификации алгоритма Хошена - Копельмана приведены в **Приложении Г**. Приведены результаты вычислительного эксперимента с использованием модификации Хошена – Копельмана. Эксперименты проводились при различных температурах в переходном режиме по числу Кнудсена по классификации Дерягина – Галояна- Яламова. Показано увеличение кластеров пара с ростом температуры, что соответствует реальной картине фазового перехода первого рода.

После пятой главы приведены **основные результаты и выводы**.

Результаты, полученные Пхью Вэй Лин являются достоверными. Достоверность обусловлена корректным применением используемого математического аппарата, теоретических положений электродинамики, теплофизики, физической кинетики, а также применением известных алгоритмов для проведения расчётов в отдельных блоках программного комплекса. Результаты с известными в литературе результатами в предельных случаях. Например, полученные автором условия электромагнитного резонанса в случае квадратичной зависимости электрической проницаемости от поля в пределе стремления к нулю параметра нелинейности переходят в известные выражения для электромагнитного резонанса для оптически линейных сфер.

Список литературы является достаточно полным и соответствует проблематике диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми и могут быть использованы в теоретических и прикладных научных

исследованиях в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, НИЯУ МИФИ, Тверской государственный технический университет, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ «СТАНКИН» и других научных организациях и учреждениях Российской Федерации, а также в организациях Республики Союз Мьянма.

Замечания по работе.

Вместе с тем в работе присутствуют следующие недостатки:

- в первой главе не обоснован диапазон чисел Кнудсена;
- во второй главе излишне подробно рассматриваются динамические системы, в том числе общеизвестные результаты;
- в четвёртой главе после обсуждения предложенной автором модификации перколяционного алгоритма показана возможность вычисления энтропии Колмогорова – Синяя по найденным кластерам, однако в пятой главе при проведении вычислительных экспериментов определены кластеры, но не проведен расчёт для энтропии, что представляло бы интерес.

Указанные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы.

Заключение.

Диссертация Пхью Вэй Лин на тему «Моделирование тепло- и массопереноса и фазовых переходов в высокодисперсных системах при воздействии электромагнитного поля», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной задачи моделирования фазовых переходов и нелинейного тепломассопереноса в мезо- и наносистемах под воздействием электромагнитного поля.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов представленная диссертационная работа на тему «Моделирование тепло- и массопереноса и фазовых переходов в высокодисперсных системах при воздействии электромагнитного поля» соответствует требованиям, содержащимся в пунктах 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (ред. от 16.10.2024 с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Пхью Вэй Лин достоин присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные и методы и комплексы программ.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, профессором Сидняевым Николаем Ивановичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры высшей математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (протокол №8 от 21.05.2025 г.).

Заведующий кафедрой высшей математики
МГТУ им. Н.Э. Баумана
доктор технических наук, профессор
Сидняев Николай Иванович
Тел.: 89629959830
E-mail: Sidn_ni@mail.ru

ВЕРНО
СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.Э. БАУМАНА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ)»
* 4 *
«21» мая 2025 г.

Секретарь заседания

Е. Павельева Павельева Е.Б.

Сведения об организации:

Полное наименование: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Сокращенное наименование: МГТУ им. Н. Э. Баумана

Адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, с.1.

Тел: +7(499) 263-63-91, E-mail: bauman@bmstu.ru, сайт: <https://bmstu.ru>