

Отзыв официального оппонента на диссертацию

Герасимова Дениса Николаевича

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ В УЗКИХ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17. – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Актуальность темы диссертации. Развитие современных технологий основано на использовании нетрадиционных физических явлений, для исследования которых необходимы принципиально новые методы как физического эксперимента, так и математического аппарата. Использование перспективных прецизионных методик физического эксперимента приводит к необходимости уточнения или принципиального пересмотра сложившихся теоретических представлений. Например, диффузия жидкостей в пористых средах, несмотря на долгую историю изучения этого явления, требует уточнения интерпретации экспериментальных данных и новых методов математического моделирования. При этом используются нетрадиционные теоретические подходы, основанные на технике дробного дифференцирования. При движении жидкости в узких каналах возникает ряд электрофизических явлений, трактовка которых в научных кругах до настоящего времени противоречива. Нет ни однозначного понимания, ни теоретических моделей возникновения свечения при движении жидкостей в узких каналах при резкой деформации потока. В литературе нет даже устоявшейся терминологии, выделяющей это явление в ряде широко исследуемых электрокинетических эффектов. Также нет однозначных объяснений возникновению локального свечения в микропузырьковых средах. В диссертационной работе проведены как экспериментальные исследования ряда электрокинетических эффектов для различных двухфазных течений в микроканалах и микропузырьковых сред. В диссертационной работе разработаны методики анализа теплового состояния межфазной границы жидкость-пар на основе методов молекулярной динамики.

Принимая во внимание возможное практическое использование результатов диссертационной работы в химической технологии, ядерной энергетике следует признать актуальным направление диссертационных исследований Д.Н. Герасимова.

Наиболее существенные принципиально новые научные и практические результаты диссертации. Диссертационная работа содержит результаты исследований, представляющих научный и практический интерес в нескольких направлениях.

1. Обоснована возможность описания течения жидкости в пористых средах на основе теории аномальной диффузии. Представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования с использованием современного аппарата дробного дифференцирования.
2. Получены новые экспериментальные данные и предложена физическая теория возникновения свечения при движении жидкости в узких каналах с резким изменением сечения.
3. Получены новые результаты анализа экспериментальных данных различных видов свечения при гидрolumинесценции, сонолюминесценции, фотolumинесценции и свечения при слабotoчном разряде в жидкости.
4. На основе аналитических подходов найдены решения, описывающие динамику процессов тепло и массопереноса внутри пузырька и формирование неравновесной газовой плазмы.
5. На основе идей молекулярной динамики развита методология прямого численного моделирования процессов тепло и массопереноса вблизи фазовой границы жидкость – пар. В рамках гипотезы об энергетическом барьере, необходимом для выхода молекул за пределы межфазной поверхности, получены новые данные о деталях механизмах интенсивного испарения и конденсации.
6. Методом молекулярной динамики получены новые данные о параметрах интенсивно излучающей плазмы при резком изменении параметров микропузырьков в жидкости.

Достоверность результатов диссертации. В диссертационной работе использованы как физический эксперимент, так и теоретическое моделирование. Достоверность результатов экспериментальных исследований основана на применении современного оборудования, повторяемости результатов экспериментов и согласием полученных данных с результатами исследований других авторов.

Достоверность результатов теоретических исследований основана на общепринятых условиях баланса физических параметров, характерных для изучаемых явлений. Привлечение современного непротиворечивого математического аппарата и согласие с результатами экспериментов, проведенных как автором диссертации, так и заимствованными из литературы, также убеждают в достоверности полученных в диссертации результатов.

Практическая значимость результатов диссертации. Практическую значимость имеют экспериментальные данные по аномальной диффузии жидкости в пористой среде и теоретическое моделирование на основе аппарата дробного дифференцирования. Кроме того, методы решения уравнений диффузии с дробными производными могут использоваться в учебном процессе в курсах теоретических основ тепло и массопереноса.

Несомненную практическую и научную ценность имеют результаты изучения свечения потоков жидкости в узких каналах при резком изменении сечения. Изучаемое явление может быть использовано при дистанционном анализе наличия различных примесей в жидких теплоносителях. С точки зрения методологии исследований по возбуждению видимого излучения в жидкостях ценность имеют результаты анализа различных механизмов, приводящих к сонолюминесценции, гидродинамической люминесценции, возникновение свечения в слабых электрических полях. Практическое значение представляют системы обработки жидкости в результате интенсивного излучения плазмы в микропузырьковых средах без использования внешних электрических полей. Теоретические исследования об интенсивной кавитации микропузырьков могут служить оценками эрозионного воздействия двухфазных газожидкостных сред в элементах энергетического оборудования.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации с приложениями – 258 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 124 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 185 наименований.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает новизну и основные достижения диссертационного исследования, результаты, защищаемые автором. Автореферат и диссертация написаны литературным русским языком.

По материалам диссертации опубликованы три монографии, один учебник, 32 научных работы в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах из перечня ВАК. Большинство публикаций входят в международные системы цитирования Web of Science/Scopus. Результаты работы неоднократно докладывались на престижных международных и российских конференциях.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования, его новизна и методология исследований, посвященных изучению аномальных диффузионных процессов и гидродинамической люминесценции.

В первой главе выведено уравнение диффузии с дробной производной по времени. Представлен обзор различных методик получения уравнения для распределения вероятности концентрации примеси в средах с внутренней структурой, замедляющей или

укоряющей случайный транспорт микрочастиц примеси. Обсуждаются экспериментальные данные по диффузии жидкости в случайно-пористой среде, подтверждающие явление аномальной диффузии. Разработана методика численного решения уравнения диффузии с дробными производными. Высказана гипотеза, что показатель дробной производной может зависеть от параметров случайно-пористой среды, частично занятой диффундирующим веществом.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию свечения жидкости при течении в узком канале. Представлено обсуждение принципиальных различий в сонолюминесценции, обычной кавитации и гидродинамической люминесценции. Описаны экспериментальные установки для иллюстрации свечения в жидкости в различных типах течений и внешних воздействиях. Разработана компьютерная программа для аппроксимации спектрального состава исследуемого излучения. Иллюстрируется удовлетворительное согласие результатов расчета по программе автора диссертации с опытными измерениями. Исследованы спектры гидродинамической и сонолюминесценции различных жидкостей. Показано, что значительная часть гидролюминесценции – это просто излучение газов, находящихся в пузырьках жидкости. Экспериментально обнаружено наличие в системе электрокинетических эффектов, то есть возникновение «потенциала потока». Высказана гипотеза, что электризация может привести к излучению, источником которого будут являться газы, содержащиеся в пузырьках газа, находящихся в жидкости. Обсуждаются различные типы свечения. В результате анализа литературы делается вывод, что плазма с энергетическими электронами, в принципе, может являться источником ионизирующего излучения, например, рентгеновского тормозного излучения. Однако, в экспериментах автора диссертации отсутствуют характерные спектральные линии гамма-излучения и рентгеновского излучения.

В третьей главе рассмотрена электризация жидкости и пузырьковая плазма, возникающая на внутренней поверхности микропузырьков. Представлены экспериментальные спектры излучения при рекомбинации возбужденных электронных уровней. Проведен анализ молекулярных полос, позволяющий выделить колебательную и вращательную температуру газа. Делается вывод, что плазма существенно неравновесное термодинамическое состояние, для которого неприменимо классическое распределение Больцмана. Результаты расчетов спектров по модели авторов удовлетворительно согласуются с данными спектральных измерений даже существенно неравновесных систем. На основе анализа экспериментальных спектров делается вывод, что газовая температура внутри пузыря способна достигать нескольких тысяч градусов. Объясняется этот

возможный эффект существенным отличием в температурах вращательных и колебательных степеней свободы молекул. Представлен подробный анализ электронной температуры для сильно неравновесной плазмы. Наблюдаемая в экспериментах заселенность уровней объясняется значительной температурой электронов. Оценка температуры электронов составляет порядка нескольких электронвольт. То же время газ остается сравнительно холодным с температурой порядка сотен градусов Кельвина.

Высказано предположение, что свечение жидкости при течении в узких каналах – это частный случай триболоминесценции. Представлены результаты исследования слабых электрических разрядов в жидкости. При разряде в жидкости, не содержащей воздух единственно возможным способом, останется возбуждением люминесцентных центров собственно электрическими зарядами. Слабые электрические разряды не разрушают структуру исследуемого вещества. Эксперименты проведены на установке автора диссертации. Из результатов экспериментов следует, что концентрация плазменных микрочастиц сравнительно невысока и соответствует температуре плазмы порядка 1000К. Установлено, что спектр излучения электрического разряда в жидкости формируется именно в жидкой фазе. Спектроскопическая диагностика плазмы показала сильную ее неравновесность. Таким образом, пузырьковая плазма пример неравновесной плазмы, у которой электронная температура значительно превышает колебательную, и вращательную. Этот экспериментальный факт также свидетельствует о том, что высокие газовые температуры в пузырьках не достигаются. На основе анализа экспериментальных данных можно заключить, что при течении жидкости в узком канале внутри пузырьков в ней образуется неравновесная, нетермическая плазма. Свечение этой плазмы и составляет гидродинамическую люминесценцию.

В четвертой главе теоретически рассмотрены нестационарные процессы на межфазной поверхности при интенсивном воздействии. В предыдущей главе было показано, что при течении жидкости в парогазовых пузырьках внутри нее образуется неравновесная, нетермическая плазма. При этом внутри пузырька нет доказательств существования весьма высоких газовых температур. С теоретической точки зрения анализируется возможность достижения высоких температур в схлопывающемся пузыре. Представлены аналитические решения для колеблющегося пузыря. Для адиабатических условий на поверхности пузыря температура внутри схлопывающегося пузырька может достигать очень высоких значений. Рассмотрены два предельных случая адиабатного пузырька и изотермического пузырька. Представлено сопоставление численного и аналитического решений уравнения Релея. Показано, если пузырь сначала сжимается, а потом расширяется, то можно получить рост температуры до тысяч и более градусов

Кельвина. Условие адиабатичности, предполагающее отсутствие теплообмена кавитирующего пузыря с жидкостью, справедливо, когда процессы расширения-сжатия происходят настолько быстро, что теплообмен не успевает произойти. На основе анализа делается вывод, что схлопывание пузыря при не слишком малых внешних давлениях можно считать адиабатическим. Для микропузырька с исходным радиусом 10 мкм значение температуры достигает 1200 К. Для смеси пара и газа внутри пузырька получено уравнение политропического процесса. Для использования приближения политропического процесса необходимо выражение для скорости испарения. С этой целью в диссертационной работе рассмотрена кинетика испарения жидкости на основе фундаментальных атомистических представлений. Используются модельные функции плотности распределения молекул по скоростям близкие к распределению Максвелла.

Далее в диссертации методы молекулярной динамики привлекаются для изучения кинетика процессов на межфазной поверхности. Теоретический анализ позволяет оценить коэффициент испарения. Результаты аналитических вычислений подтверждаются численным моделированием методом молекулярной динамики. Численное моделирование позволяет определить избыточный унос массы вследствие конденсации горячего пара на поверхности жидкости. Этот эффект может наблюдаться, например, при достижении температуры пара внутри коллапсирующей полости порядка ~ 1000 К. Результаты численного моделирования методами молекулярной динамики удовлетворительно согласуются с аналитическими распределениями, полученными на основе квазиравновесного распределения Максвелла. Используется концепция работы выхода частицы за пределы межфазной границы. Представлены результаты численного моделирования вылета за пределы межфазной границы кластера частиц. Рассмотрен модельный случай испарения, вызванного вылетом частиц с поверхности жидкости после удара об эту поверхность частицы газа с экстремально высокой скоростью. Представлены результаты моделирования методами молекулярной динамики взрывного вскипания жидкости.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертации. Отмечаются основные достижения работы, взаимосвязь результатов, полученных в разделах диссертации, с общей стратегией исследования. Подчеркивается значение общих результатов исследования для развития современных моделей механики сплошных сред.

По диссертации имеются замечания.

1. При описании явления диффузии в случайных средах (с. 24) следовало бы упомянуть классические работы Taylor (Taylor, G. I. Diffusion by Continuous Movements, Proc.

London Math. Soc., 1921, 2(20), 196.), в которых установлена фундаментальная связь между микропараметрами случайного движения частиц (автокорреляционной функцией случайных скоростей частиц) и макропараметром – коэффициентом диффузии.

2. В обзоре литературы по дробному дифференцированию следует упомянуть работы отечественных ученых, например, Золотарев В.М. и др., ЖЭТФ, 1999, Т.115., вып. 4; В.В. Учайкин, УФН, 2003, 173, № 8. В этих работах в отличие от диссертации дробная производная в уравнении диффузии аппроксимирует диффузионный поток, а производная по времени записывается в классическом виде. В диссертации следовало бы дать анализ существующих в литературе подходов для моделирования уравнения диффузии с использованием дробного дифференцирования.
3. На стр. 31 диссертации (формула 1.6.2) делается замечание, что производная Римана – Лиувилля от константы не равна нулю. Это совершенно корректно, т.к. (В.В. Учайкин, УФН, 2003) дробная производная является нелокальной функцией и обращается в ноль только при целых порядках дифференцирования.
4. В формуле (1.7.8) на стр. 34 непонятна размерность величин, входящих в уравнение.
5. При анализе результатов экспериментальных исследований по гидродинамической люминесценции возникает вопрос о влиянии концентрации микропузырьков на порог возникновения люминесценции. Будет ли свечение для дегазированной воды?
6. При анализе аналитических решений динамики газовых пузырьков в жидкости следовало бы обсудить влияния коллективных нелокальных эффектов, возникающих в двухфазной системе при нестационарных хаотических колебаниях давления в несжимаемой жидкости.
7. Методы молекулярной динамики – мощный современный аппарат моделирования микроскопического движения молекул в жидкой фазе. Однако, создается впечатление, что иллюстративность детальных результатов расчетов и возможность моделирования экстремальных параметров теплофизических процессов не дает возможности перехода к приближению сплошной среды, в которой реализованы современные идеи термодинамики с учетом фазовых превращений. Например, при моделировании методами молекулярной динамики взрывного вскипания жидкости (раздел 4.5.6) непонятно, можно ли с помощью этих данных расчета описать явление спинодального распада (см., например, В.П. Скрипов, А.В. Скрипов, УФН, 1979, Т. 128, вып. 2).
8. В формуле (1.5.2) диссертации и в автореферате в формуле (11) допущена опечатка. Режим стандартной диффузии реализуется при значении параметра $\alpha = 1$.

9. В списке литературы 123 пропущено название журнала.

Сделанные замечания не снижают корректности и ценности результатов, представленных в диссертации Д.Н. Герасимова. Диссертация Дениса Николаевича Герасимова является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области гидродинамики, тепло и массопереноса в двухфазных газожидкостных средах в микроканалах с учетом гидродинамической люминесценции, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор диссертации Денис Николаевич Герасимов заслуживает ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Доктор технических наук, профессор
Профессор кафедры «Прикладная математика»
Факультета фундаментальных наук
Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

Деревич

22.03.24

Игорь Владимирович Деревич

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Место нахождения	РФ, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Почтовый адрес	РФ, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Телефон организации	+7 (499) 263-6391
Адрес электронной почты; адрес официального сайта организации	bauman@bmstu.ru http://www.bmstu.ru

ВЕРНО

Подпись Деревича И.В. заверяю:



ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ
И АДМИНИСТРАЦИИ
НАЗАРОВА О.В.
ТЕЛ. 8-499-263-60-48