

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им.
А. В. Топчиева Российской академии наук,

член-корреспондент РАН,

А. Л. Максимов

29.02.2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Герасимова Дениса Николаевича на тему: «Механика жидкости и излучение плазмы в узких диэлектрических каналах», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Течение жидкости в узких каналах (включая пористую среду) является широко распространенным явлением, которое сопровождается рядом физических явлений, которые, несмотря на многолетние исследования, во многом остаются не изученными. Очевидным примером этого является излучение, возникающее при протекании жидкости, физика которого изучена недостаточно. Целью работы было построение описания течения жидкости, базирующегося на проведенных экспериментах, теоретических исследованиях и моделировании. Для этого был решен ряд задач, таких, как описание аномальной диффузии, анализ условий возникновения излучения и причин его появления и др.

Тема диссертационной работы является актуальной.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 258 страниц, включая 124 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 185 наименований.

Во Введении дан краткий обзор по тематике диссертации, сформулированы общие положения диссертации, такие, как актуальность работы, научная новизна, практическая значимость, цели исследования, задачи исследования, апробация работы, опубликованные работы, положения, выносимые на защиту. Автор внес основной вклад в постановку задач, в подготовку и проведение экспериментов, обработку и интерпретацию результатов.

Раздел принципиально важен, поскольку определяет актуальность задач диссертации и место исследований автора в общем контексте исследований в этой области.

Первая глава содержит теоретическое рассмотрение задачи течения жидкости в пористой среде, которое описывается в терминах аномальной диффузии как немарковскому процессу. Анализируются условия, при которых происходит аномальная диффузия и подходы к ее теоретическому описанию. Предложен подход и представлен численный метод решения дробно-дифференциального уравнения аномальной диффузии. Метод использовался для решения разных задач. В частности, в качестве примера рассмотрено проникновение жидкости в пористую среду и результаты расчетов удовлетворительно согласовываются с экспериментальными данными.

Глава 2 содержит описание явления свечения жидкости (гидродинамической люминесценции) при ее течении в узком диэлектрическом канале. Явление известно давно, но физика его не ясна и систематических исследований проведено мало. Рассмотрены возможности рассмотрения этого явления наряду с другими сходными, например, с сонолюминесценцией. Автор справедливо отмечает, несмотря на некоторые сходства, отождествлять физику этих явлений оснований нет.

В главе описаны экспериментальные установки, использованные как для исследования гидродинамической люминесценции, так и для акустической кавитации, а именно, установка для изучения гидролюминесценции воды. Установка представляет собой замкнутый контур, в котором прокачивается вода при давлении до 150 атм. В качестве каналов использовались каналы из оргстекла и кварца с диаметром 1 мм. Для диагностики свечения использовались спектрографы AvaSpec с разным спектральным разрешением. Измерялась также разность потенциалов на канале. В жидкость добавлялся аргон (аргоновый термометр).

Сходная установка была использована для изучения гидролюминесценции индустриального масла И-40А.

Установка для исследования сонолюминесценции включала в себя генератор ультразвуковых колебаний с титановым ультразвуковым волноводом, погруженным в жидкость (в качестве сосуда использовалась пластиковая емкость). В качестве рабочих жидкостей использовались вода, глицерин, масло и др.

Для обработки спектров использовалась протестированная оригинальная программа.

На основе полученных результатов сделан вывод о том, что для возникновения гидродинамического свечения необходим большой перепад давления на канале и источником свечения являются пузырьки растворенного в жидкости газа. Кроме того, на канале наблюдается разность потенциалов, достигающая сотни вольт.

В главе приводятся результаты исследования сонолюминесценции, которая в условиях экспериментов наблюдалась не во всех жидкостях. В частности, результаты свидетельствуют о том, что мощность ионизирующих излучений из светящихся областей совпадает с фоновыми значениями как для сонно-, так и для гидролюминесценции. Здесь нужно отметить тщательность автора в интерпретации полученных результатов. В частности, он показал, что наблюдаемый кажущийся рентгеновский спектр имеет другую природу.

Глава содержит много интересных результатов, детальное обсуждение которых проведено в главе 3

В третьей главе проведен детальный анализ информации, полученной методом эмиссионной спектроскопии излучения гидролюминесценции и сонолюминесценции. В результате обработки спектров получены сведения о физических параметрах светящейся области в газовом пузыре. Глава содержит много важных результатов. Отметим только некоторые. Приводятся примеры спектров излучения гидролюминесценции воды. Спектр содержит излучение второй положительной системы азота, полосы гидроксидов OH, линии атомарного водорода, линии атомарного аргона (добавлялся для диагностики). Отмечено спектральный состав излучения изменяется вдоль длины канала. Атомарные линии использовались для определения температуры возбуждения, молекулярные полосы использовались для получения информации о вращательной и колебательной температурах молекул.

Проанализирован спектр гидролюминесценции масла, в котором наблюдается излучение иона азота, а также сплошной спектр. Для идентификации последнего проведены специальные эксперименты и показано, что это спектр индуцированной люминесценции жидкости.

Проведено сопоставление гидролюминесценции в фотолюминесценцией, с излучением электрического разряда в жидкости (в этом случае были проведены специальные эксперименты), и с сонолюминесценцией.

Рассмотрен вопрос об электризации жидкости при акустической кавитации.

Один из главных выводов главы: вследствие электризации жидкости при протекании по каналу происходит пробой газа в пузырях и образование сильно неравновесной плазмы, излучение которой регистрируется. Температура газа в пузыре

остается комнатной. Гидродинамическая люминисценция имеет трибоэлектрическую природу.

В Четвертой Главе рассмотрены нестационарные процессы на межфазной поверхности. В частности, проведено аналитическое моделирование кавитирующего газового пузыря в адиабатическом и изотермических приближениях. Показано, что диаметрально противоположные условия не очень сильно сказываются на результате: максимальный радиус пузырька отличается на ~30%, период колебаний – на ~40%, а максимальная скорость роста пузыря выше в изотермических условиях всего лишь на 20%. В то же время температура газа в пузыре отличается значительно. Рассмотрено схлопывание пузыря в адиабатических и изотермических условиях. На основании анализа времени колебания пузыря сделан вывод о том, что режим можно считать адиабатическим. Рассмотрено изменение температуры в схлопывающемся пузыре, изменение давления вокруг кавитирующего пузыря.

Рассмотрено поведение пузыря при изменении массы газа в нем за счет испарения жидкости, проанализирована кинетика процесса испарения (получены аналитические выражения и представлены результаты численного моделирования, верифицирующие аналитику, получено выражение для коэффициента испарения жидкости, зависимость количества испаряющихся частиц от температуры). Проведено численное моделирование процесса испарения с помощью разработанного автором кода.

Решена задача о распределении давления в окрестности схлопывающегося пузыря, проведен учет потока массы в процессе сжатия пузыря, увеличения температуры, отводе тепла к границе и испарения жидкости. Исследована кинетика процесса испарения, включая расчет коэффициента испарения, и многое другое.

По прочтении диссертации возник ряд вопросов. Они были обсуждены с автором и некоторые из них приводятся ниже.

Замечания.

1. Зачем нужны большие давления и какова скорость потока в канале? Часто в тексте забывается указывать давления. Это значительно затрудняет анализ результатов (например, приведенное электрическое поле, степень ионизации)
2. Рис. 2.5.2 – что же было параметром при сравнении экспериментальных спектров и расчетов. Равновесная плазма, какая температура? Это же относится к рис. 2.5.5. В тексте говорится о верификации по излучению второй положительной системы азота. Что можно сказать об излучении первой положительной системы? Из заключения раздела 2.5. следует, что используя подгоночные параметры можно получить согласие расчетных спектров и измеренных. Но это вряд ли можно назвать тестированием программы. Для тестирования нужно брать измеренный спектр с известными параметрами и.....
3. В разделе 2.7. говорится о наблюдении сонолюминесценции при точной настройке генератора акустических колебаний. Что означает точная настройка частоты? Там же говорится о возможности регулировки режима сонолюминесценции и резонансной частоте без пояснения физики этого влияния.
4. В тракт добавлялся аргон (раздел 3.1.) для диагностики («и только», подчеркивается автором). Это не совсем так. Аргон является и источником пузырьков, в которых образуется разряд, в который затем поступают пары воды. Таким образом, в условиях экспериментов пузыри играют определяющую роль, и это определяется условиями эксперимента.
5. Представляется, что по рис.3.1.4 определить температуру возбуждения нельзя. Он скорее свидетельствует об отсутствии бальмановского распределении и различных каналах заселения различных излучающих состояний.
6. Текст содержит неверное утверждение (п.3.1.): «Излучающая плазма слишком

неравновесна, чтобы можно было сделать точный расчет ее параметров, пользуясь общеизвестными методами, применимыми, строго говоря, лишь в случае полного термического равновесия». Уже разработаны и широко используются кинетические модели, описывающие процессы в сильно неравновесной плазме.

7. Значение температуры электронов 10 эВ при давлении 100 атм. вызывает сомнение.
8. При анализе аномального излучения линии аргона (3.1.6) полезным было бы привести характерные времена процессов, чтобы понять, насколько рассматриваемый механизм реален. Здесь знания относительных заселенностей мало и нужны абсолютные концентрации.
9. В случае люминесценции масла, как и в случае воды нужно понимать, что определяющую роль может играть воздух. Т.е. говорить о люминесценции масла, строго говоря, не корректно.
10. В п.3.2 делается вывод о том, что возбуждение люминесцентных центров производится в масле электронами, образованными в плазме. Какова глубина проникновения этих электронов в объем масла?
11. В экспериментальной установке для исследования разряда в жидкостях не представляется определить точно расстояние между электродами из-за их электростатического притяжения. На наш взгляд, это означает, что механическая часть разрядной системы неудачна и не обеспечивает сохранения геометрии разрядной системы. Почему выбраны электроды из луженой меди, казалось бы применение тугоплавких металлов, как это делается обычно, было бы предпочтительным.
12. С. 144: «зависимость перестает так хорошо описывать экспериментальные данные; это заметно и по «хвосту» экспериментального графика на рис. 3.3.5.». На рисунке это трудно заметить.
13. В выводах к главе 3 написано: «внутри пузырьков в ней образуется неравновесная, нетермическая плазма». Нужно писать что-либо одно – неравновесная или нетермическая, т.к. это по сути одно и то же.

Отмеченные замечания не снижают достоверности и важности полученных в диссертации результатов.

Автором выполнен большой объем работ, связанный с исследованием малоизученного явления свечения, создаваемого при протекании жидкости в узких каналах.

Новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений.

Основной научный результат, на наш взгляд, можно сформулировать следующим образом:

Гидродинамическая люминесценция имеет трибоэлектрическую природу: вследствие электризации жидкости при протекании по каналу происходит пробой газа в пузырьках и образование сильно неравновесной плазмы, излучение которой регистрируется.

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и представлены в четырех монографиях (в числе которых один учебник), 33 журнальных публикациях, большинство из которых индексируется в WOS.

Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики и применения низкотемпературной плазмы (ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, МРТИ РАН, ИНХС РАН, ИПФ РАН, МГУ, МГТУ, К(П)ФУ, КНИТУ, ИГХТУ, МИФИ и др.).

Диссертация Герасимова Д.Н. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены важные задачи, связанные с исследованием физических процессов, приводящих к возникновению

свечения при протекании жидкости в узких каналах, с исследованием процессов диффузии жидкости в пористых материалах. Задачи и содержание работы отвечают паспорту специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертационная работа Герасимова Д.Н. отвечает критериям пункта 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертационная работа Герасимова Г.Н. была заслушана на заседании секции «Физика, химическая физика, физическая и коллоидная химия» Ученого совета ИНХС РАН от 20 февраля 2024 г (протокол № 7).

И.О. Зав. лабораторией "Плазмохимии и физикохимии
импульсных процессов" ИНХС РАН,
главный научный сотрудник,
доктор физико-математических наук



Ю. А. Лебедев

Сведения о составителе отзыва:

Лебедев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, почтовый адрес: 117597, Москва, Литовский бульвар, д.1., кв. 490, тел.: 8(495)4270926, адрес электронной почты: lebedev@ips.ac.ru, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), должность: И.О. заведующего лабораторией, главный научный сотрудник.

Подпись д.ф.-м.н. Ю.А. Лебедева заверяю.

Ученый секретарь ИНХС РАН
доктор химических наук



Ю.В. Костина

Адрес организации: 119991, Москва, Ленинский проспект, 29, тел. 8(495) 9544275, e-mail: tips@ips.ac.ru