

Отзыв

на диссертационную работу **Батукаева Тимура Саидэмиевича** на тему «Физико-химические характеристики микроволнового разряда в жидких диэлектриках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.9 Физика плазмы.

Актуальность темы

Диссертация Т.С. Батукаева посвящена исследованию характеристик микроволнового разряда в жидкости. Этот тип разряда может быть реализован с помощью двух типов антенн – в первом случае поле возбуждается с помощью помещаемых в жидкость цилиндрических металлических стержней, во втором – с помощью тонких щелей в металлическом экране. Как в том, так и в другом случае в окрестности антенны создается электрическое поле, которое и возбуждает разряд.

Хотя в обзоре литературы описываются оба типа установок, экспериментальные исследования посвящены изучению первого типа разрядов, инициируемых стержневой антенной. С точки зрения эксперимента преимуществом такого типа разряда является концентрация микроволнового поля в небольшой области пространства, что облегчает возникновение разряда. Следует отметить, что динамика развития разряда имеет многостадийный характер. На начальной стадии микроволновое излучение проходит через толщу жидкости, затем у торца антенны формируется газовый пузырек, в котором создается разряд. Размер газового пузырька постепенно увеличивается, затем этот пузырек, в зависимости от условий разряда может оставаться в месте, где генерируется электрическое поле, либо происходит отрыв пузырька от антенны и его всплытие вследствие действия силы Архимеда, а при больших мощностях можно ожидать формирование газового канала, выходящего на поверхность жидкости. Несмотря на сложность и физических и химических процессов и сложную динамику разряда, параметры плазмы, пузырьков и жидкости не были экспериментально исследованы. Возможно, что частично это объясняется тем, что исследования этих разрядов начались только в 2000-х годах.

Кроме сложной физики и химии процессов в этом типе разрядов он может быть использован в большом числе технических приложений. В качестве примеров можно указать задачи очистки воды от вредных примесей, производство водорода (здесь установки на разряде в жидкостях сравнимы по эффективности с газофазными), осаждение алмазных и алмазоподобных пленок, синтез карбида кремния, углеродных нанотрубок.

Таким образом, можно утверждать, что в диссертационной работе Т.С.Батукаева не только исследованы основные процессы формирования разряда в жидкости, в особенности на начальных стадиях его формирования, но и сформулированы принципы нового типа газоразрядных устройств, которые могут быть использованы в различных технологиях. С учетом вышесказанного, востребованность и актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Поставленные автором в диссертационной работе цели основаны на критическом анализе большого объема литературы, посвященной исследованиям разряда в жидкостях (список литературы содержит 114 наименований). В результате выполненного анализа автор пришел к вполне обоснованному заключению, что разряд в жидкостях может быть перспективным инструментом для решения целого ряда задач. В итоге автором была поставлена задача детального экспериментального исследования основных характеристик микроволнового разряда в жидкости с временным разрешением различными оптическими

и акустическими методами. На основании полученных результатов построить физическую картину процессов в разряде. Провести исследование газофазных продуктов разряда для различных жидкостей и барботируемых газов, с целью определения возможности применения микроволновых разрядов в жидкостях для решения прикладных задач. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации на основе качественно выполненных исследований, являются с высокой степенью обоснованными.

Для решения поставленных целей автором были сформулированы 8 задач детальных экспериментальных исследований свойств разряда.

Достоверность и новизна исследования, полученные результаты, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации.

Новизна полученных результатов определяется использованием сложной экспериментальной установки, которая включала себя возможность регистрации интегрального по объему и спектру излучения разряда, интегральной интенсивности свечения разряда, визуализацию развития разряда с помощью высокоскоростной видеокамеры, регистрацию акустических колебаний, генерируемой разрядом. Визуализация градиентов плотности среды, возникающих в быстрых процессах проводилась методом Шлирена. Использовалась также теневая съемка разряда. Измеренные спектры давали возможность определить вращательную и колебательную температуры газа. Использовались два варианта установки для разряда в неполярных (нефтепродуктов) и полярных (вода и водные растворы этанола) жидкостях. Барботирование дало возможность оценить влияние вводимых газов – аргона, гелия, CO_2 . Столь широкий спектр надежных диагностик и изучаемых процессов был использован в эксперименте впервые, что обусловило получение **достоверных и новых результатов**.

В результате автором обнаружены следующие новые физические эффекты.

1. Впервые показано, что разряд представляет собой последовательность импульсов. Длительность каждого импульса определяется временем с момента появления пузырька с плазмой до момента его отрыва от кончика антенны. Каждый разряд сопровождается ударной волной.

2. Впервые показано, что ударная волна, возникающая на конце антенны, возбуждает затухающие звуковые колебания в объеме реактора над поверхностью жидкости. Частоты колебаний соответствуют частотам собственных резонансных колебаний газового столба в реакторе. Ударная волна, отраженная от поверхности жидкости, вызывает колебания газового пузыря, создаваемого разрядом в жидкости и его движение к основанию антенны.

3. Впервые показано, что образующиеся углеродсодержащие частицы в плазме под действием отраженной ударной волны осаждаются на дно реактора, в месте входа антенны в реактор. Следствием этого является нагрев и испарение жидкости у основания антенны и затруднение образования разряда на конце антенны.

4. Впервые показано, что электронный удар в плазменных процессах на коротких временах играет определяющую роль в иницировании физико-химических процессов.

5. Впервые показано принципиальное отличие от разрядов в газах: параметры плазмы в единичном разряде практически не зависят от мощности, но количество единичных разрядов прямо пропорционально мощности.

6. Впервые определены температуры разряда в Нефрассе С2 80/120 с барботажем дополнительными газами. Определено изменение температур разряда, установлено, что после момента зажигания вращательная и колебательные температуры электронно-возбужденных состояний частиц стремятся к одному значению, плазма становится более равновесной.

7. Впервые определены зависимости скоростей образования продуктов газовой фазы от падающей мощности и потока барботируемого газа для разряда в Нефрассе С2 80/120, при атмосферном давлении.

8. Впервые показаны зависимости степени разложения углекислого газа и скоростей образования продуктов в микроволновом разряде в Нефрассе С2 80/120 с барботажем смеси углекислого газа и аргона, при атмосферном давлении.

9. Впервые показаны зависимости скоростей образования продуктов в разряде в водном растворе этанола от падающей мощности и концентрации этанола в растворе, при атмосферном давлении.

10. Впервые показаны зависимости скоростей образования продуктов в разряде в воде с барботажем метана, при атмосферном давлении.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Впервые описан микроволновый разряд в жидкости на начальной стадии. Впервые экспериментально показано влияние ударной волны на пузырек с продуктами плазмохимических реакций. Впервые определены зависимости скоростей образования продуктов газовой фазы в микроволновом разряде в Нефрассе С2 80/120 с барботажем дополнительными газами, в разряде в водном растворе этанола и в воде с барботажем метана, при атмосферном давлении.

Впервые экспериментально получена картина физических процессов на начальной стадии микроволнового разряда в жидкости.

Показана возможность применения микроволнового разряда для получения водорода на примере различных типов жидкостей и барботируемых газов.

Впервые получены температуры и динамика изменения температур частиц в микроволновом разряде в Нефрассе С2 80/120 с барботажем при атмосферном давлении.

Впервые показана перспективность использования микроволнового разряда в Нефрассе С2 80/120, при атмосферном давлении, для разложения углекислого газа с целью получения синтез газа.

Было выявлено, что основными газовыми продуктами разряда являются водород, ацетилен, оксид углерода, данные продукты широко используются в большом количестве в современных технологий.

Полученные результаты принципиальны для конструирования технологических реакторов, использующих микроволновые разряды в жидкости.

Содержание диссертации

Диссертация Батукаева Т.С. содержит 124 страницы текста, включая 68 рисунков и 3 таблицы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, в котором сформулированы основные результаты работы. Список цитируемой литературы содержит 114 наименований.

Во **введении** отражена актуальность работы, сформулированы ее цели и решаемые задачи, научная новизна и практическая ценность. Представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен обзор литературы. Рассмотрены методы генерации микроволновых разрядов в жидкости, описаны характеристики микроволнового разряда в жидкости. Также приведены известные примеры применения микроволновых разрядов для получения полезных газофазных продуктов, синтеза твердых частиц, синтеза новых соединений в жидкости и разложении веществ в жидкостях под действием микроволнового излучения. В конце главы сформулированы выводы и постановка задач исследования.

Вторая глава содержит описание экспериментальной установки для создания микроволнового разряда (2,45 ГГц) в жидком диэлектрике, описание методики проведения

эксперимента, разрядной камеры и изменений, которые были выполнены для получения микроволнового разряда в воде и водных растворах этанола.

В **третьей главе** на основании экспериментальных результатов сформулирована картина физических процессов в микроволновом разряде в жидких углеводородах на примере нефтяного растворителя Нефрасе С2 80/120 и водных растворов этанола.

Установлено, что микроволновый разряд в жидком диэлектрике существует внутри пузырька с газом. Возникновение разряда сопровождается возникновением ударной волны, которая, отражаясь от стенок реактора, создает затухающие звуковые колебания. Показано, что определяющую роль в плазмохимических процессах на начальной стадии играет электронный удар. С помощью теневых фотографий и фотографий Шлирен методом показано влияние конфигурации антенны и барботажа на специфику существования микроволнового разряда в жидкости. Анализ спектров излучения полос Свана позволил определить динамику вращательных и колебательных температур в плазме.

В конце главы обобщены результаты и сформулирована физическая картина микроволнового разряда в жидких диэлектриках.

В **четвертой главе** приведены примеры применения микроволнового разряда при атмосферном давлении в Нефрасе С2 80/120, водных растворах этанола и воде с добавлением гидроксида калия для получения полезных газофазных продуктов. Основным продуктом разряда является водород. Исследовалась возможность управления химической активностью с использованием барботажа аргона и гелия для получения водорода. Критерием изменения химической активности служило изменение выхода различных компонентов газовой смеси. Наилучший результат по получению водорода был получен для микроволнового разряда в водном растворе этанола.

В конце главы обобщены результаты исследования продуктов газовой фазы микроволнового разряда в жидких диэлектриках

В качестве достоинства диссертационной работы следует отметить, что автором впервые проведен анализ начальной стадии разряда и определение нескольких фаз развития разряда, а также обнаружен факт, что при увеличении мощности, вкладываемой в разряд размеры пузырьков газа (а также параметры плазмы в них) не изменяются, а растет частота их генерации.

Безусловно изюминкой работы являются следующие результаты.

1. Обнаружение влияния ударной волны на пузырек с газом и возникновение звуковых колебаний над поверхностью жидкости.

2. Результаты исследования динамики вращательной и колебательной температур S_2 частиц разряда в Нефрасе с барботажем дополнительными газами (аргон, гелий, углекислый газ).

3. Получение водорода в водном растворе этанола.

По диссертации можно сделать следующие замечания.

1. Иногда правильная мысль выражена в диссертации не вполне корректно. Например, на стр. 16 есть фраза «микроволны поглощаются штыревыми антеннами, расположенными внутри реактора, на концах которых образуется плазма». Антенны здесь используются скорее, как четвертьволновые инициаторы, а поглощение идет в образующейся плазме, а не в антеннах.

2. Одной из используемых сред, в которой производится разряд, является Нефрасе С2 80/120. Он упоминается уже на второй странице введения. О составе данной жидкости речь идет только в третьей главе (стр. 45), и то не приводится полного состава. Между тем существует стандарт на данную смесь, и она содержит (в значимых количествах) 6 компонентов, которые необходимо было привести в диссертации.

3. В работе отсутствуют оценки плотности заряженных частиц в разряде. Безусловно, учитывая, что разряд происходит в пузырьке малого размера, который находится внутри жидкости, придумать метод, который позволил бы провести такие измерения и затем реализовать его на практике очень сложно. Однако, наверное, можно было бы привести оценки, исходя из давления газа, его размеров, и баланса мощности в разряде.

Отмеченные выше недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и являются, по сути, либо замечаниями редакционного толка, либо пожеланиями для дальнейшего развития сделанной работы.

В целом, диссертация Батукаева Т.С. является законченной научной квалификационной работой, посвященной экспериментальному исследованию физических особенностей микроволнового разряда в жидких диэлектриках. Полученные результаты, среди которых есть ряд новых, достаточно подробно изложены в диссертации. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Содержание диссертации в полной мере отражено в 10 публикациях. Статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах и базе РИНЦ.

Представленная работа соответствует критериям, установленным для кандидатских диссертаций Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а ее автор Батукаев Т.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы.

Официальный оппонент,
профессор кафедры физической
электроники физического
факультета Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова,
доктор
физико-математических наук,
доцент

Двинин С.А.

Согласен на обработку персональных данных

Контактные данные:

Телефон:

E-mail:

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские Горы 1, строение 2, физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Кафедра физической электроники.