ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

Физический факультет

Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества



Реферат

По дисциплине Английский язык.

На тему:

**«Изучение и применение диэлектрического барьерного разряда для контроля воздушных потоков»**

Выполнил студент магистратуры

1 года обучения:

Уланов П.Ю.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Проверил:

Старший преподаватель

Английского языка Лелека Н.С.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Москва**

**2020 год**

**Оглавление.**

[Введение. 2](#_Toc41241956)

[Основная часть. 3](#_Toc41241957)

[1. Теория барьерного разряда. 3](#_Toc41241958)

[1.1 Микроразряды и стримеры в ДБР. 3](#_Toc41241959)

[1.2 Структуры микроразрядов. 4](#_Toc41241960)

[1.3 Режимы протекания ДБР. 7](#_Toc41241961)

[2. Применение ДБР для управления потоком. 8](#_Toc41241962)

[2.1 Использование ДБР для задержки перехода на аэродинамическом профиле. 9](#_Toc41241963)

[2.2 Задержка перехода с использованием неустановившегося срабатывания DBD. 10](#_Toc41241964)

[2.3 Непосредственное управление потоком с помощью ДБР. 11](#_Toc41241965)

[2.3.1 Плазменные вихревые генераторы. 11](#_Toc41241966)

[2.3.2 Закрыли Гёрни. 12](#_Toc41241967)

[2.3.3 Плазменные генераторы бегущих волн. 12](#_Toc41241968)

[Заключение. 13](#_Toc41241969)

# Введение.

Использование диэлектрического барьерного разряда (ДБР) началось в европейских странах около 100 лет назад. Использование свойств генерации ультрафиолетового излучения позволило исследователям применить данный тип разряда для целей обеззараживания во многих направлениях. Одно из ярких примеров использования диэлектрического барьерного разряда было производство озона, который применим для отчистки питьевой воды.

В настоящее время промышленное использование диэлектрического барьерного разряда успешно применяется для контроля загрязнения воды, обработки поверхности полимеров, чтобы повысить смачиваемость, пригодность для печати и адгезию и контроля воздушных потоков с различными гидродинамическими свойствами.

С изобретением тлеющего разряда атмосферного давления, который также основан на ДБР, фундаментальное понимание и исследование барьерных разрядов стало очень важным.

Диэлектрический барьерный разряд – низкотемпературный разряд, в основном работающий при атмосферном давлении. Конструкция ДБР может быть разной, однако фундаментально она состоит из двух электродов, которые разделены диэлектриком в несколько миллиметров. Диэлектрический барьер может быть изготовлен из стекла, кварца, керамике или полимера – материалов с низкими диэлектрическими потерями и высокой прочность. При приложении переменного тока (1-20 кГц), около каждого электрода формируется плазменное свечение. Разряд протекает в самых различных газах через большое количество токовых нитей, называемых микроразрядами. Они имеют сложную динамическую структуру, которая формируется стримерными пробоями, бьющими в одно и то же место при каждой смене полярности приложенного напряжения, выглядя как яркие нити. Из-за накопленного на поверхности диэлектрического барьера уменьшает электрическое поле, что приводит к прекращению тока в течение нескольких десятков наносекунд. Из-за того, что длительность тока коротка, ДБР отличается низким тепловыделением и плазма от такого вида разряда является нетепловой.

# Основная часть.

## Теория барьерного разряда.

### Микроразряды и стримеры в ДБР.

Барьерный диэлектрический разряд в большинстве случаев является неоднородным и состоит из большого количества нестационарных локальных микроразрядов. Они распределены по всему объему разрядной области и имеют вид ярких плазменных нитей. Основные положения теории микроразрядов заключены в сложной теории, которая включает в себя законы и уравнения из динамики поля. Общий механизм образования микроразрядов начинается с первоначального перехода электронной лавины в стример. Стример – это локализованные волны ионизации, которые двигаются от анода к катоду, чтобы встретить лавины, распространяющиеся в противоположном направлении. Возникновение стримера обусловлено приложенным напряжением, которое достаточно велико, чтобы локальное поле от «накопленных» у анода зарядов позволило сформироваться стримеру.

Скорость стримеров очень велика и составляет порядка 108 см/с, что на порядок больше чем скорость лавины. Расстояния между электродов стример проходит за время порядка наносекунд.

В момент смены полярности приложенного напряжения стримеры «бьют» в одно и то же место. Это явление называется «эффектом памяти». Устойчивость стримеров к одному месту объясняется зарядом, который был нанесен на диэлектрический барьер, и остаточным зарядом и возбужденными частица в канале микроразряда.

Динамическое описание микроразрядов основано на формировании, распространении и взаимодействии стримеров во всем временном промежутке. Электроны из-за своей малой массы быстро рассеиваются из зазора между электродами, в то время как тяжелые медленные ионы остаются в разрядном промежутке. Накопление электронов из проводящего канала на анод приводит к предотвращению образования новых лавин и стримеров пока полярность приложенного напряжения не поменяется. При смене полярности снова происходит образование новых лавин с формированием стримеров в одном месте.

### Структуры микроразрядов.

Само понятие стример было введено в начале прошлого столетия и изучения данного феномена интенсивно проводилось в течении 20 – го века. Однако явления, происходящие непосредственно между стримерами, были изучены лишь недавно.

При проведении экспериментов по генерации диэлектрического барьерного разряда, было выявлено поведение стримеров, которое заставляло микроразряды упорядочиваться в регулярные структуры, схожие с кулоновскими кристаллами. Хотя существование подобных структур было выявлено ранее, физика данного феномена была не объяснена. Качественно описание дало лишь четкое понимание того, что структуры микроразрядов существенно влияют на производительность диэлектрического барьерного разряда.

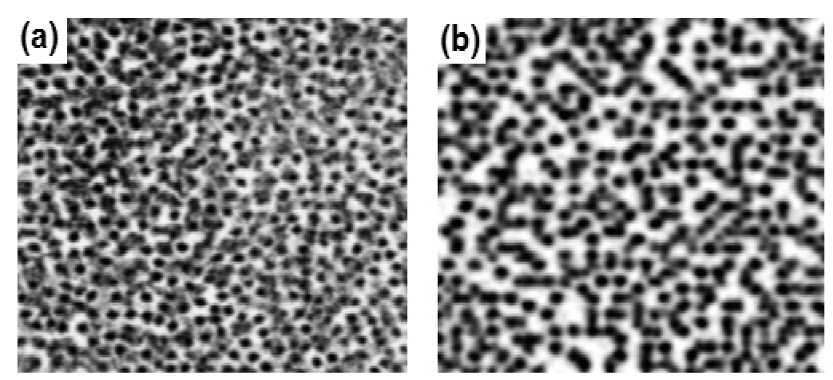
Инновационная модель, которая моделирует динамика нитевидного разряда с учетом эффекта памяти была разработана в Институте плазмы Дрекселя совместно с компанией Eastman Kodak. Модель основана на предположении, что объемный заряд канала микроразряда уменьшает электрическое поле и предотвращает образование стримера рядом с этим каналом. Из-за того, что после разряда в канале остаются только положительные частицы, вследствие их большей массы по сравнению с электронами, накопленный положительный заряд влияет на образование соседних стримеров и, следовательно, микроразрядов. Так как переход из лавины в стример зависит от электрического поля рядом с анодом, откуда прорастает новый стример, образование соседних микроразрядов и стримеров предотвращается из-за накопленного положительного заряда, и поэтому микроразряды «отталкиваются» друг от друга. Данное квазиотталкивание приводит к формированию ближнего порядка, зависящего от расстояния между микроразрядами. В большинстве случаев это приводит к самоорганизации микроразрядов в регулярные структуры.

Наблюдение явления самоорганизации разрядов зависит от большого количества условий, включая количество микроразрядов и рабочую частоту ДБР. В экспериментах, где количество микроразрядов было мало, их взаимодействие и организация в структуры не наблюдалась. Если приложенное электрическое поле достаточно велико, то микроразряды возникают во всех не занятых местах и, так как все разряды разделены примерно на расстояние, образуются регулярные структуры микроразрядов.

Для получения изображений микроразрядов в основном используется старейший метод Лихтенберга. Метод основан на получении изображения, путем регистрации света от микроразряда на фотопленке, которая может быть расположена под прозрачный изолятор (стекло или кварк). После обработки следа на фотопленке получают информацию о физическом размере, плотности (удары в единицу площади) микроразряда. В качестве фотоэлемента используют фотопластины, содержащие фотостимулируемый люминофор. Этот класс неорганических материалов обладает свойством «накапливания» энергии ионизирующего излучения в виде радиационных дефектов решетки. Значение этой энергии может быть получена методами селективной фотостимуляции.

На Рис.1 а) изображена пластина, которая была размещена на электроде для непосредственного воздействия плазмы от диэлектрического барьерного разряда. Более четкие черные точки соответствуют стримерам, которые в данную область неоднократно «били». Главной особенностью является то, что микроразряды окружены белыми областями. Эти белые области являются «запрещенными», то есть где стримеры не могут ударить, причем эти области в основном расположены рядом с микроразрядами. Именно этот факт является подтверждением, что микроразряды взаимодействуют между собой.

На Рис. 1 b) представлены результаты численного моделирования микроразрядов по методу Монте – Карло, который учитывал местоположение предыдущих стримеров. Чем сильнее был эффект взаимодействия разрядов, тем меньше было случайных ударов стримеров.



**Рис. 1** Изображения «следов» стримера в зазоре ДБД на воздухе в течение 10 циклов возбуждения при 20,9 кГц и зазоре разряда 0,762 мм: а) исходное экспериментальное изображение; б) результат моделирования (увеличено).

### Режимы протекания ДБР.

Диэлектрический барьерный разряд может протекать в двух основных режимах: стримерный (яркие микроразряды) и свечение (однородный разряд). В большинстве промышленных применений ДБР используют стримерный режим, так как удельная мощность такого разряда выше. Для обработки поверхностей или для осаждения тонких пленок требуется свечение в режиме разряда.

Для более обширного применения в промышленности необходимо получать стабильные разряды, которые смогут долгое время удерживаться в режиме свечения без перехода в стримерный (нитевидный) режим. К сожалению, все еще трудно контролировать подобные переходы при атмосферном давлении, особенно в электроотрицательных газах. Изменение конфигурации электрода или небольшое изменение амплитуды или частоты подаваемого напряжения от источника приводит к переходу системы в более стабильный и энергетически выгодный стримерный (нитевидный) режим. Также, из-за электростатических явлений в области разряда состав газа может меняться, что ведет к переходу в более стабильный режим.

Для стабильной работы диэлектрического поверхностного разряда необходимо разработать теорию, которая был описывала достаточно точно явления переход из одного режима в другой. В настоящее время над данной проблемой работают несколько исследовательских групп.

В лабораторных исследованиях разряд запускали в гелии или в других неотрицательных газах, однако задача стоит в том, чтобы поддерживать режим свечения в электроотрицательных газах без присутствия гелия, главным образов, в воздухе. С. Оказаки смог успешно применить режим свечения в воздухе, изменив специальным образом конфигурацию электродов, однако теоретического обоснования до сих пор нет. Физическое обоснование перехода приведет к оптимизации процедуры разряда и к дальнейшему применению данного разряда в промышленности.

## Применение ДБР для управления потоком.

Диэлектрический барьерный разряд (актуатор), помещенный на профиль обтекаемого сверхзвуковым потоком профиля, способен воздействовать на характер течения в области пограничного слоя. Как известно, при обтекании различных профилей образуется сложная картина течения за объектом: образуется отрыв потока, формируется дорожка Кармана, появляются нестационарные вихри. Переход пограничного слоя на профиле характеризуется переходом от ламинарного потока к турбулентному. Таким образом, актуаторы на основе диэлектрического барьерного разряда способны снизить турбулентность около профиля, что влияет не только на сам объект (турбулентность в самолете), но и на внешнее пространство (звуки от ветряной электростанции).

Работа над данными актуаторами проводилась в рамках проекта PlasmAero, финансируемого Европейской комиссией. Главная цель заключается в оценке возможностей плазменных приводов управлять воздушными потоками.

Воздействие разряда на поток было исследовано еще в прошлом столетие, однако применения подобных разрядов для военной и гражданской авиации до сих мор нет. По сути, эти актуаторы можно разделить на две группы, в зависимости от вида генерируемой плазмы: нетепловая или термическая плазма. Термоплазменные актуаторы основаны на генерации равновесного разряда, чтобы локально увеличить давление и температуру окружающего газа. Нетепловые плазменные актуаторы, такие как диэлектрический барьерный разряд или коронный разряд освнованы на генерировании неравновесного поверхностного разряда, который индуцирует силу тела, параллельно стене внутри пограничного слоя. Это явление также имеет название «ионный ветер».

#### Использование ДБР для задержки перехода на аэродинамическом профиле.

Для использования диэлектрического барьерного разряда в целях управления переходом используется либо устойчивое, либо неустановившееся включение. Так как данный актуатор имеет различные возможности внесения импульса в систему, он может вызывать непрерывное или нестационарное добавление импульса к пограничному слою в зависимости от электрического сигнала высокого напряжения.

В ходе проекта PlasmAero были проведены эксперимента, относящиеся к двухмерной стабилизации пограничного слоя с использованием плазменного актуатора в непрерывном режиме работы. К аэродинамическому потоку добавлялся квазистационарный импульс, непосредственно воздействующий на профиль средней скорости пограничного слоя. Такое применение позволило снизить усиление возмущений и отложить переход на профиле. В качестве экспериментального профиля была использована плоская пластина с искусственно возбужденным возмущением.

В результате были получены результаты, демонстрирующие задержку перехода не менее чем на 10% от длины профиля с точки расположения естественного перехода без использования диэлектрического поверхностного разряда.

Для подтверждения того факта, что задержка перехода обусловлена изменением профиля средней скорости, управление пограничным слоем с устойчивым поведением было исследовано численными методом. Расчеты были проведены для двух случаев: базовый случай (без плазмы) и случай с добавлением в цифровом виде актуатора к профилям средней скорости. Условия проведения численного эксперимента были аналогичны экспериментальным для более детальной количественной оценки.

Качественно результаты численного эксперимента сошлись с реальным. Разница между измеренными и прогнозируемыми точками перехода может быть объяснена относительно простой использованной моделью ионного ветра. Стоит сказать, что современные численные схемы и модели расчетов показывают более точные результаты в силу обобщения всех явлений, протекающих на аэродинамическом профиле.

Обобщая результаты исследования, стоит отметить, что плазменные актуаторы диэлектрического барьерного разряда, используемые в установившемся режиме, оказывают стабилизирующее воздействие на пограничный слой.

#### Задержка перехода с использованием неустановившегося срабатывания DBD.

Для достижения цели переноса перехода на аэродинамическом профиле также используется неустойчивая модификация актуатора, которая воздействует непосредственно на волны Толлмина – Шлихтинга, растущие внутри пограничного слоя и запускающие переход. Данный подход также называется «активное аннулирование волн». Цель заключается в искусственном возмещении с нестационарным производством силы для демпфирования естественной волны Толлмина – Шлихтинга посредством деструктивных помех. Задержка перехода осуществляется за счет локального уменьшения амплитуды этих волн.

Один из вариантов воздействия заключалось в использовании нестационарной выработки силы плазменного актуатора ДБР в течение одного цикла рабочей частоты. Исследования показали, что актуатор создает локальную нестационарную силу из-за различных режимов разряда между положительным и отрицательным полупериодами.

Регулировка фазового соотношения между волнами Т. – Ш. и сигналом возбуждения актуатора может убрать данные волны, тем самым перенести переход на пограничном слое профиля.

#### Непосредственное управление потоком с помощью ДБР.

Имеется ряд задач, для которых необходимо минимизировать механическое составляющее аэродинамического объекта, так как любая подвижная часть системы оказывает дополнительное механическое влияние на поток и на пограничный слой. Любой пневматический, гидравлический и электромагнитный привод требует наличие движущихся частей таких как клапаны, диафрагмы, цилиндры или шестерни для их активации.

Для рассмотрения подобных задач удобнее использовать актуаторы типа диэлектрического барьерного разряда. К примеру вихревые генераторы можно успешно заменить на актуаторы ДБР. С помощью этого возможно избежать потери сопротивления профилю. Также актуаторы основанные на ДБР срабатывают на порядок быстрее, чем аналоги, и могут быть легко интегрированы с гибридными электромоторами и полностью электрическими моторами. Подобные системы актуаторов успешно могут быть использованы для решения проблем обтекания, снижения расхода топлива, равномерность зажигания и экономичность производства.

Самыми яркими примерами замены актуаторов на диэлектрический барьерный разряд отмечают в следующих объектах: плазменные вихревые генераторы, плазменные закрылки Гёрни, генераторы бегущей волны плазмы.

##### Плазменные вихревые генераторы.

Суть вихревых генераторов заключается в создании стационарных продольных вихрей определенной структуры потока. Обычно для их создания используются генераторы лопастного типа. Путем изменения направления пристеночной струи от плазменного актуатора диэлектрического барьерного разряда можно создавать сильные продольные вихри.

Основной принцип заключается в том, что электрогидродинамическая сила тела и возникающая стенная струя направлены в продольном направлении, перпендикулярно входящему потоку, следовательно, струя около стены закручивается в продольном направлении встречным пограничным слоем. Это формирует продольный вихрь из наконечника плазменного актуатора. Также пристеночная струя непрерывно добавляет завихренность, чтобы увеличить циркуляцию по длине актуатора. Вихри можно быстро включать и выключать без перетаскивания профиля. Сам ДБР монтируется заподлицо в вихревой камере.

##### Закрыли Гёрни.

Закрылки данного типа состоят из небольшой вертикальной пластины с несколькими процентами хорды, прикрепленной к боковой стороне аэродинамического профиля на задней кромке. Несмотря на то, что это небольшое устройство, коэффициент подъемной силы может быть значительно увеличен с его помощью.

Для увеличения показателей прижимной силы, был установлен плазменный актуатор на тупой задний край аэродинамического профиля. Тем самым были увеличены показатели прижимной силы на 5%. При установки плазменного актуатора на расположенную ниже по потоку поверхность механического клапана Гёрни показатели увеличились вдвое.

##### Плазменные генераторы бегущих волн.

Один из типов поперечного движения стенки достигается с помощью поперечных бегущих волн. Этот феномен является часть изучения сопротивления трению кожи.

Снижение сопротивления трения на коже достигалось изменением потока граничной завихренности, который был вызван ускорением стенки. Так как явления, связанные с сопротивлением основаны на силе Лоренца, то изменение электромагнитной составляющей пристеночного потока позволяет увеличить амплитуду бегущих волн, тем самым снижая трения с кожей.

# Заключение.

Диэлектрический барьерный разряд является безусловно одним из ярких примеров прогресса за последнее столетие. Разработанные модификации ДБР и выведенная теория позволяет уже много лет упрощать рабочие приборы от экспериментальных установок до промышленного оборудования. Безусловно стоит отметить применение разряда именно для контроля транс- сверхзвуковых потоков, так как проблемы влияния турбулентности и критических явлений тесно связаны с прогрессом в области автомобильной, авиакосмической и энергетической промышленности. Для снижения показателей шума в окружающей среде использование ДБР является лучшим вариантом из возможных с экономической и экологической точки зрения. Контроль ламинарно – турбулентного перехода позволит в дальнейшем не только увеличить управляемость и уменьшить расход топлива летающего аппарата, но и обезопасить полеты гражданской авиации.

Развитие теории разрядов во многом зависит от разработки новых модификаций и применений диэлектрического барьерного разряда в силу его относительной простоты и применимости в нормальных и критических условиях. Хоть и теория ДБР до сегодняшнего дня не является полной, больше количество исследовательских групп работают над ней.

# Список литературы.

[1] A. Chirokov, A. Gutsol, and A. Fridman. Atmospheric pressure plasma of dielectric barrier discharges. Department of Mechanical Engineering and Mechanics, Drexel Plasma Institute, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, USA. 9 p.

[2] A. Kurz, S. Grundmann, C. Tropea, M. Forte, A. Seraudie. Boundary layer transition control using DBD plasma actuators. AerospaceLab. 8 p.

[3] K. Choi1, N. Jukes, D. Whalley, L. Feng, J. Wang, T. Matsunuma, T. Segawa. Plasma virtual actuators for flow control. UK. 13 p.

# Глоссарий.

boundary layer – пограничный слой

DBD – диэлектрический барьерный разряд

actuator – привод (актуатор в тексте)

non-thermal – нетепловая

free stream – свободный поток

artificially – искусственно

framework – структура

compressible – сжимающийся

corona discharge – коронный разряд

non-equilibrium – неравновесная

ionic wind – ионный ветер

quiescent – неподвижный

ability – способность

transition – переход

approaches – подходы

active wave cancellation – активное аннулирование волны

subsonic – дозвуковой

transonic – околозвуковой

open-return tunnel – возвратный туннель

adjust – регулировать

downstream – вниз по течению

air-exposed – свободно воздушный

spanwise flow – продольный поток

polished – полированный

magnitude – величина

explorations – исследования

quasi-steady – квазистационарные

amplification – усиление

consider – рассматривать

unstable – нестабильное

investigation – исследование

continuously – непрерывно

quiescent – неподвижный

numerical – численный

exact – точный

envelope – конверт

distinguish – выделить

receptivity – восприимчивость

eigenmodes – собственные моды

convected – конвектируется

trigger – импульс

rapidly – быстро

artificial – искусственный

shifted – сдвинут

shock wave – ударная волна

flow separation – отрыв потока

tangled stream – спутный поток

rarefaction wave – волна разряжения

resistance – сопротивление

skin friction – кожное трение

industrial application – промышленное применение

diaphragm – диафрагма

the blades – лопасти

wing – антикрыло

surface coating – поверхностное нанесение материалов

simplicity – простота

spatial force – пространственная сила

disturbances – нарушения

delay – задержка

unsteadily – не стационарно

high-frequency – высокочастотный

correspondingly – соответственно

cancellation – отмена

asymmetric behavior – ассиметричное поведение

upstream – вверх по течению

closed-loop control – управление с обратной связью

naturally occurring – встречающийся в природе

disturbance – нарушение

unaffected – незатронутый

susceptible – восприимчивый

utilized – используется

permanent optimized phase – постоянная оптимизированная фаза

control algorithm runs on – алгоритм управления работает на основе

excited – возбужденный

adapted – адаптированный

hot-wire – горячий провод

reveals – показывает

prominent – видный

сonsequently – следовательно

overall – в целом

visible – видимый

reduced – уменьшенный

turbulence – турбулентность

laminar turbulent transition – ламинарно турбулентный переход

Complementary – дополнительный

destabilizing – дестабилизирующий

proves – доказательства

surrounding – окружающий

nozzle – сопло

pneumatic – пневматические

hydraulic – гидравлический

aligned – выровнен

longitudinal – продольный

wall jets – пристенные форсунки

leading-edge – передовой

recirculation – рециркуляция

airfoil camber – аэродинамический профиль

embedded – встроенный

penetration – проникание

depth – глубина

deformable – деформируемый

viscosity – вязкость

bidirectional – двунаправленный

opposing spanwise directions – противоположные направления