

МАГНИТОПЛАЗМЕННАЯ АЭРОДИНАМИКА. ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Отделение магнитоплазменной аэродинамики и МГД преобразования энергии

Д.С. Баранов, В.А. Битюрин, А.Н. Бочаров, В.Г. Бровкин, С.С. Бычков, П.В. Веденин, В.Ю. Великодный,
А.В. Галактионов, В.А. Грушин, А.С. Добровольская, П.П. Иванов, П.Н. Казанский, А.А. Каримов, Н.И. Ключников,
А.И. Климов, И.А. Моралев, А.С. Пащина, Н.А. Попов, В.Р. Соловьев, Е.А. Филимонова, А.А. Фирсов, Д.Н. Яранцев

ОИВТ РАН
27 июня 2016

- Содержание

- Введение
- Цели
- Особенности и проблемы в задачах плазменной аэродинамики
- Подходы и методы исследований
- Основные механизмы воздействия плазмы на среду и основные эффекты
- Плазменные актуаторы
 - Традиционные актуаторы на основе барьерного разряда
 - Комбинированные МГД актуаторы
 - Актуаторы на основе капиллярных разрядов
 - СВЧ актуаторы
 - Актуаторы на основе капиллярных разрядов
- Выводы по результатам исследований

- Содержание (продолжение)

- Перспективные исследования и практические приложения

- МГД актуаторы в вертолетостроении (ОИВТ – МВЗ им. М.Л. Миля)
- Новые направления в развитии вычислительных комплексов в задачах аэродинамики (ОИВТ – МИТ)
- Разрядное зажигание в двигателях внутреннего сгорания
- Развитие гиперзвуковых МГД технологий (ОИВТ – ЦАГИ)

Введение

Первые предложения использовать электрические и магнитные поля для изменения теплофизических и (газо-)динамических характеристик потоков в 40-х – 50-х годах прошлого столетия Б.С. Стечкин, А. Кантровиц,...

От А. Кантровица, по-видимому, началось развитие МГД метода преобразования тепловой энергии в электричество

Б.С. Стечкин является патентообладателем (40-е годы) по использованию энерговыклада (нагрева) перед высокоскоростным летательным аппаратом

В современном виде магнитоплазменная аэродинамика сформировалась в 1990-е годы

В ОИВТ РАН деятельность НИЦ МГД, ранее занимавшегося в основном МГД генерацией энергии для базовой энергетики, постепенно переместилась в новую область. С 1999 по настоящее время ОИВТ РАН проводит ежегодные конференции по магнитоплазменной аэродинамике (три дня от 80 до 100 докладов).

Цели

Бесконтактное управление аэродинамическим качеством и/или иными характеристиками аэродинамических тел

Создание управляющих сил и моментов, действующих на ЛА

Управление процессами воспламенения и горения в проточных камерах сгорания

Особенности

Пространственная и временная много масштабность процессов

- диапазон характерных времен от 10^{-12} до 10^{-3} сек
- диапазон характерных размеров от 10^{-6} до 10^1 м

Широкий температурный диапазон

Необходимость предионизации (при обтекании с числами Маха ниже ~ 10)

Сочетание неравновесности процессов и неоднородности распределений требует, как правило, аккуратного учета пространственных и нестационарных процессов

Потенциальные механизмы воздействия на среду

Тепловой

Механический

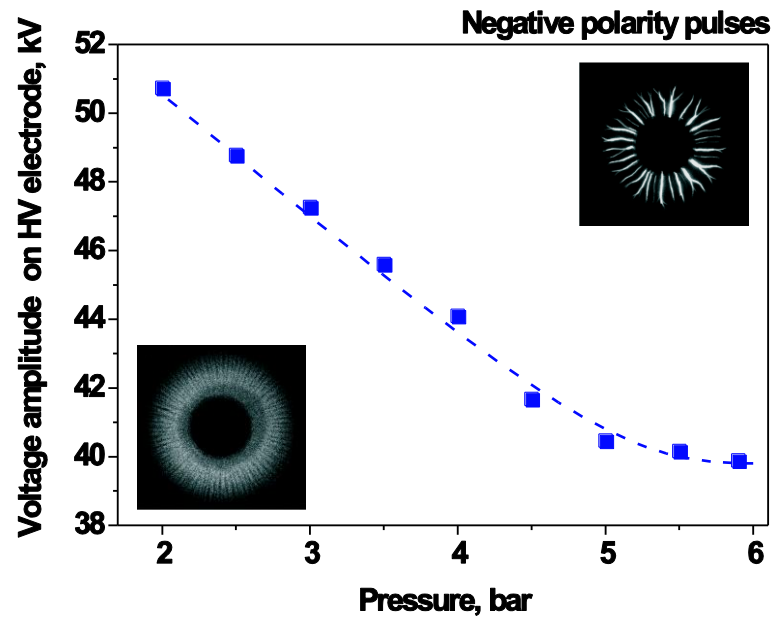
Плазмохимический

Подходы и методы исследований

- Лабораторный эксперимент (в основном на базе ОИВТ РАН)
- Эксперимент на полупромышленных стендах и установках (ЦАГИ, ЦИАМ, ЦнииМаш, МВЗ им. М.Л. Миля, 2ЦНИИ МО)
- Численное сопровождение эксперимента
- Численное моделирование с использованием собственных программных продуктов и коммерческих пакетов

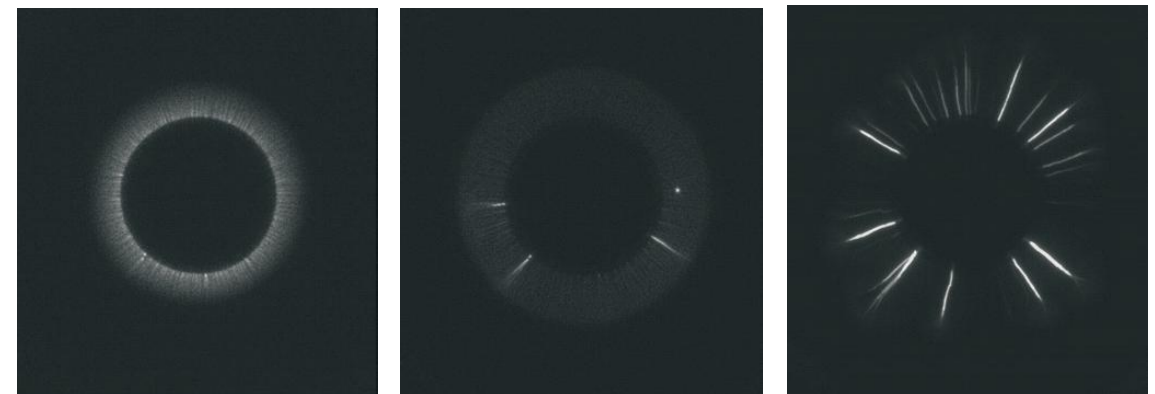
Поверхностный барьерный разряд

Stepanyan, Starikovskiy, Popov, Starikovskaia (2014)



Пороговое напряжение перехода в филаментарную форму снижается с ростом давления

Поверхностный барьерный разряд (ПБР) – квазиоднородная и филаментарная форма



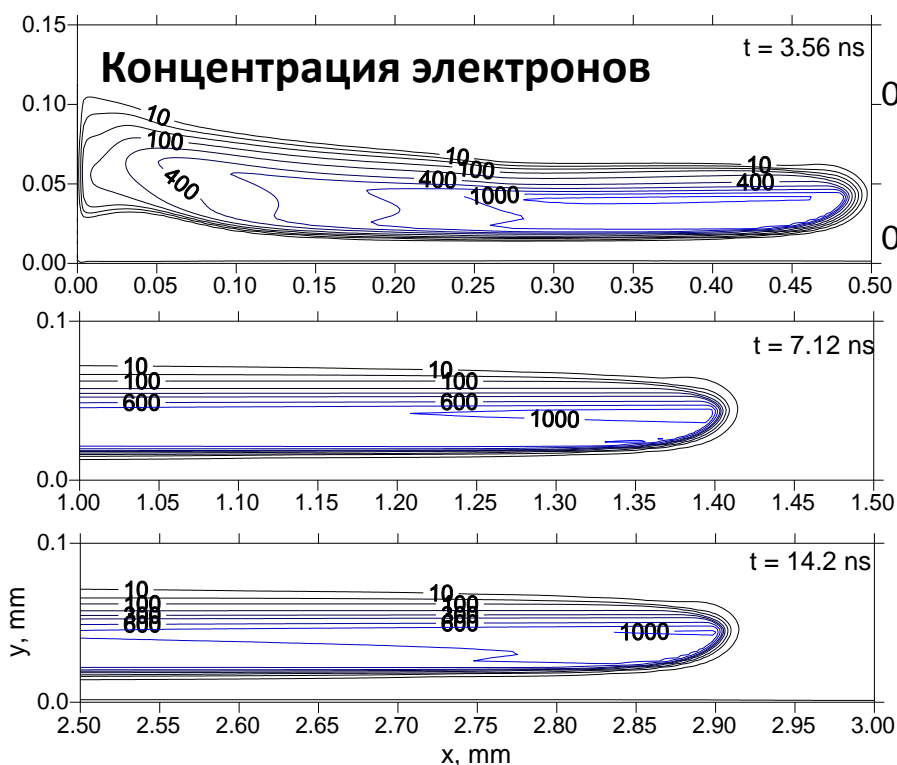
4 ns

6 ns

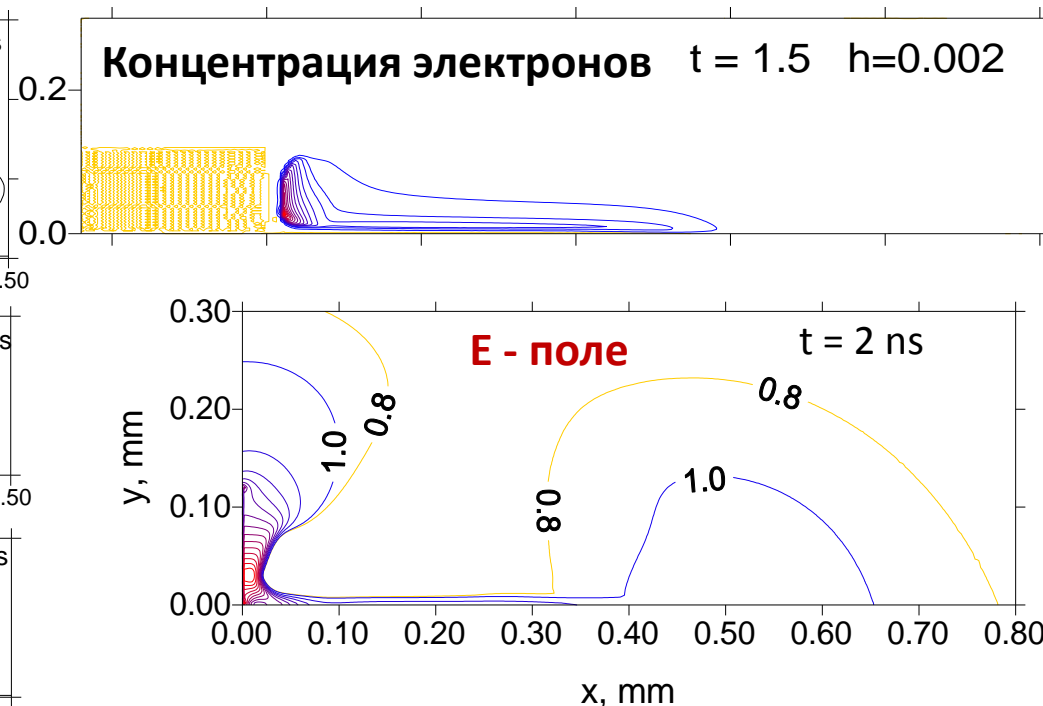
9 ns

Поверхностный барьерный разряд

Моделирование квазиоднородного ПБР в 2D приближении. Soloviev, Krivtsov 2009



Стримерный разряд при положительной полярности электрода



Скользящий диффузный разряд при отрицательной полярности электрода

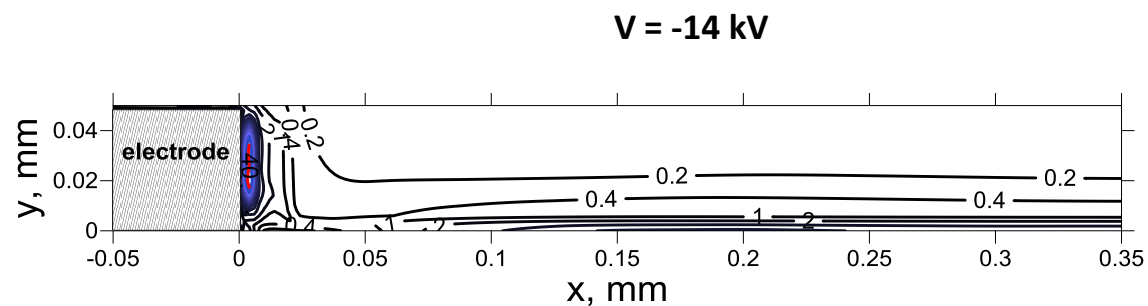
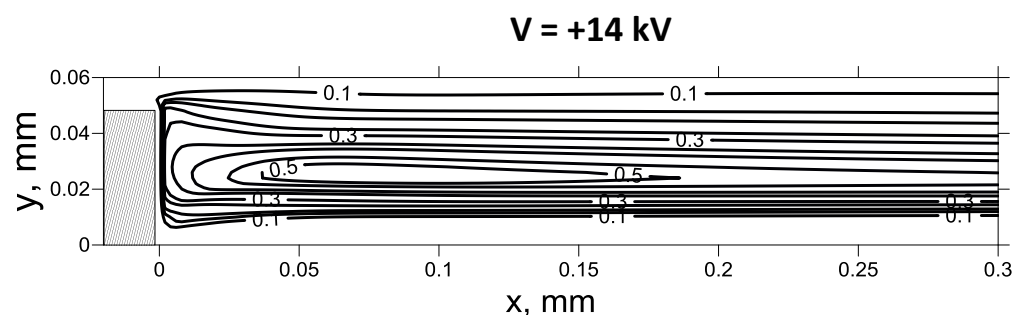
Поверхностный барьерный разряд

Возможности применения

Контролируемые возмущения потока

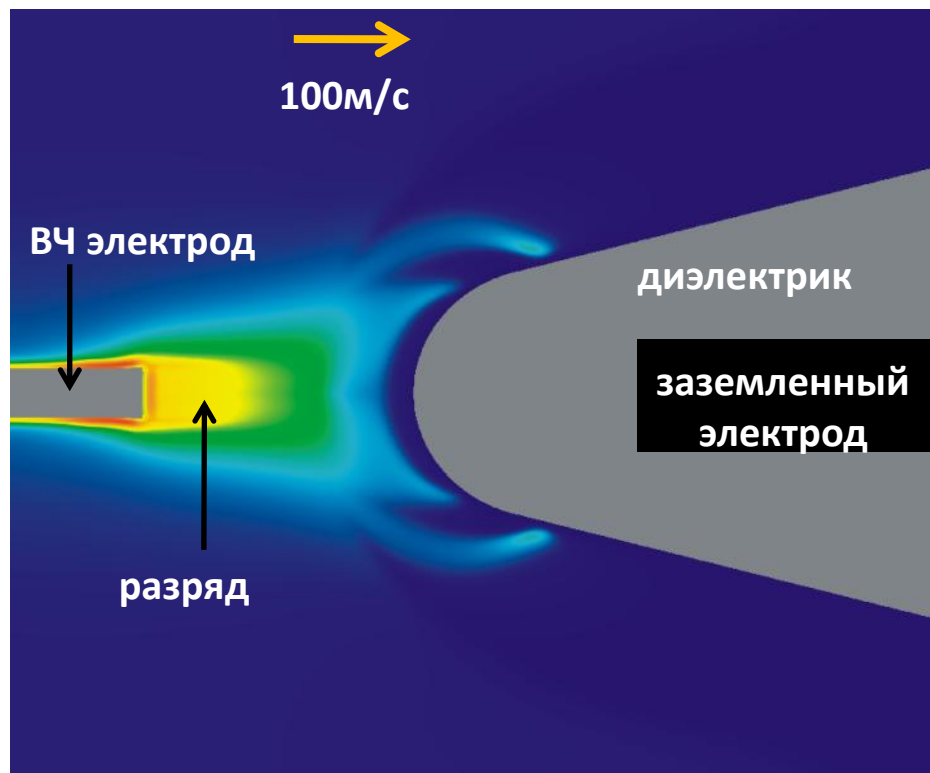
Наработка активных радикалов и

Энерговклад для стимуляции поджига горючих смесей

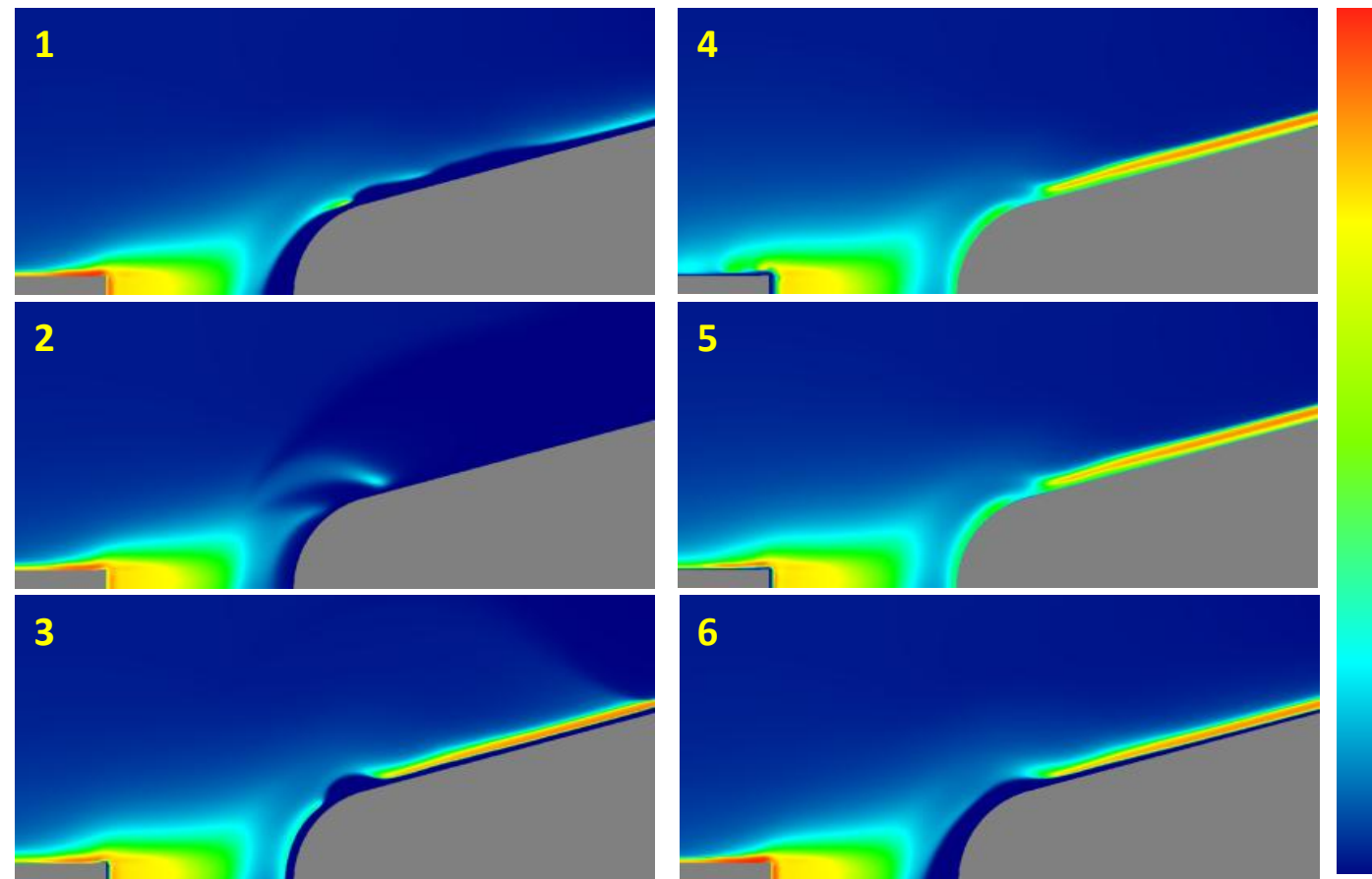


Изолинии энерговклада в Дж/см³ за импульс 30 нс (Soloviev V., Krivtsov V., 2015)

Высокочастотный разряд (Битюрин, Бочаров, 2007)

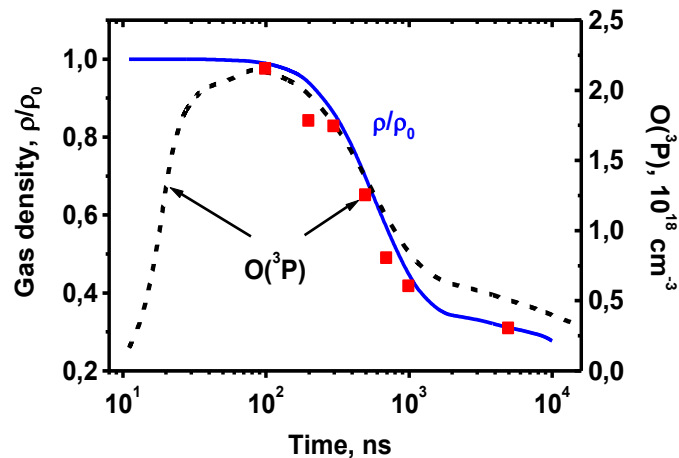
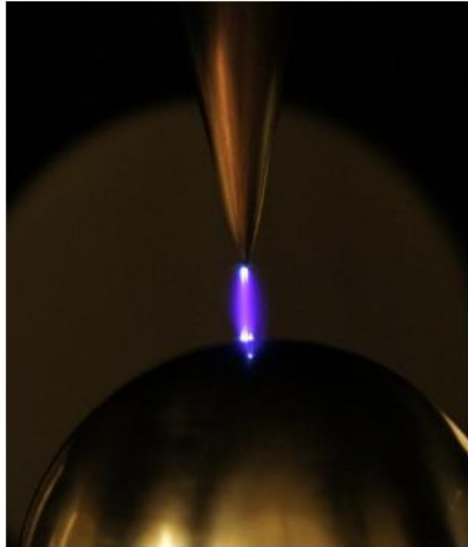


$R_s = 5\text{мм}$, $D_{\text{ВЧ}} = 1\text{мм}$, $P = 100\text{кПа}$, $T = 300\text{К}$,
 $U = 100\text{м/с}$, $\nu = 500\text{кГц}$, $U = 30\text{кВ}$



концентрация электронов ($2 \cdot 10^{12}\text{см}^{-3}$), $\Delta\varphi = 72^\circ$

Быстрый нагрев (Н.А. Попов)



Примеры расчетов по модели, которая использовалась для моделирования кинетики в задачах плазменной аэродинамики и плазменного воспламенения. Расчеты проводились для условий работы
Lo A., Cessou A., Boubert P., Vervisch P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. 115201; 115202.

Исследовался импульсный наносекундный разряд $I_{\max} = 65 \text{ A}$, $t_{\text{imp}} < 25 \text{ нс}$, $f = 10 \text{ Гц}$, $d = 6.5 \text{ мм}$ в воздухе атмосферного давления, $T_0 = 300 \text{ К}$. Методом спонтанного Рамановского рассеяния измерялись временные профили населенностей колебательных уровней $N_2(v)$ и $O_2(v)$, а также температура газа.

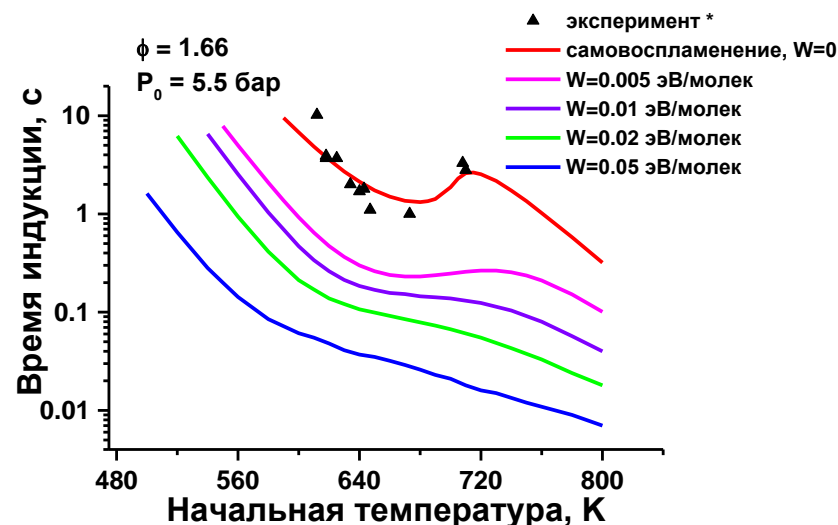
На Рис. 1 показан вид разряда, а на Рис. 2-3 приведены экспериментальные данные [*Lo A., Cessou A., Boubert P., Vervisch P.*] и результаты расчета временной динамики плотности атомарного кислорода и температуры газа на оси разряда. Как видно, в разряде происходит и значительный нагрев газа, и диссоциация молекул кислорода (степень диссоциации достигает 50%). Отметим, что аналогичные импульсные наносекундные разряды активно используются и в задачах плазменной аэродинамики и для наработки активных частиц в задачах плазменно-инициированного воспламенения горючих смесей.

Плазмохимическое воздействие разряда на воспламенение горючих смесей

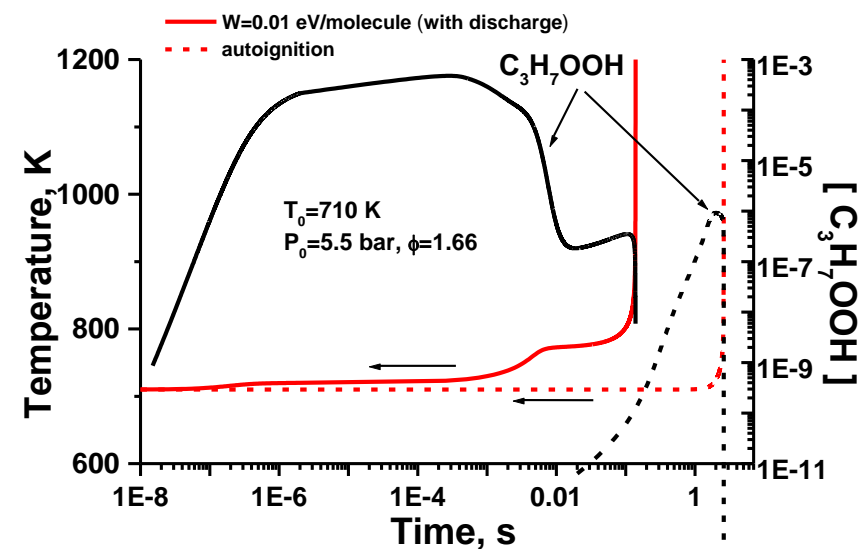
E.A. Filimonova. Discharge effect on the negative temperature coefficient behaviour and multistage ignition in C_3H_8 -air mixture, *J. Physics D: Applied Physics*. 2015, **48**, 1, 015201.

Благодаря разрядному воздействию можно достигнуть уменьшения начальной температуры воспламенения на 250° и времени индукции до 100 раз. Продемонстрирована возможность значительно уменьшить вероятность возникновения стука в двигателе внутреннего сгорания, в том числе, дизельного.

Зависимость времени задержки воспламенения от начальной температуры смеси, энерговклада в разрядный канал (W)



Зависимость температуры и концентрации пропилгидропероксида с разрядом и без разряда



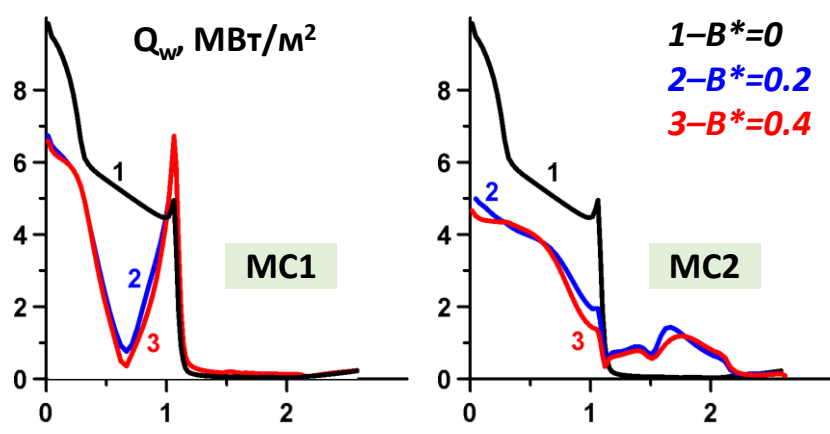
* Kane G. P. *Proc. of the Royal Society*. 1938, **A 167**. p.63.

МГД управление гиперзвуковыми потоками

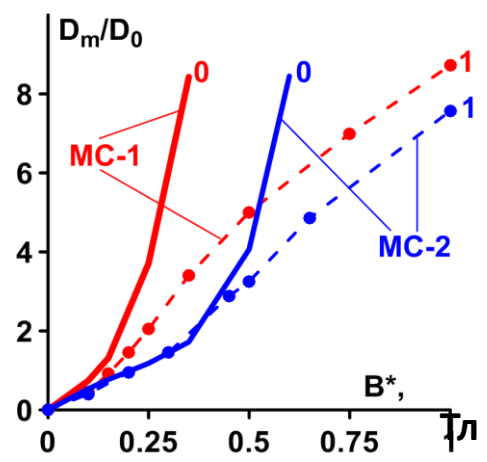
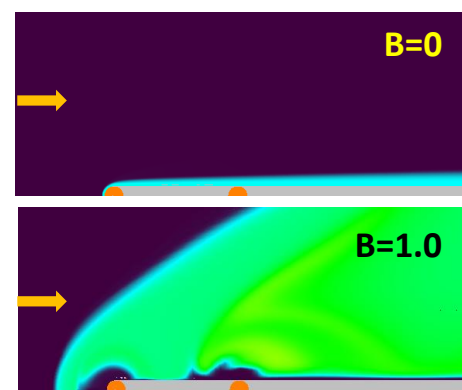
Битюрин, Бочаров (2005-2010)

МГД снижение тепловых нагрузок

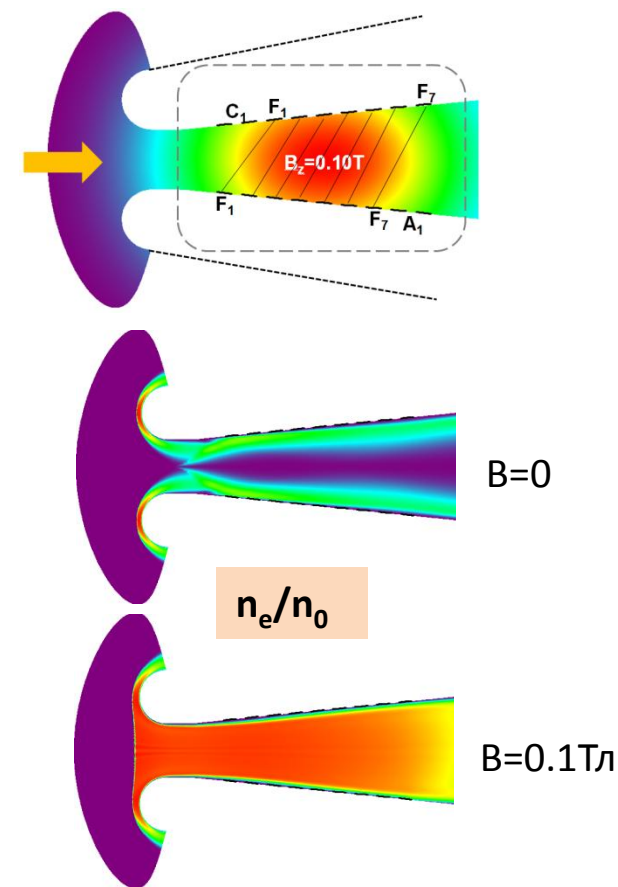
Stardust: $H=60$ км, $V=11100$ м/с, $M=36$, $B=0.2$ Тл



МГД торможение



МГД генератор на борту ГЛА, P = 3 МВт



Плазменная аэродинамика

Гиперзвуковые течения
Ионизация происходит в ударном слое

До- и сверхзвуковые течения ($M < 10$)
Для создания плазмы требуется дополнительный источник ионизации – газовый разряд

Плазменные актуаторы - устройства на основе газового разряда для управления потоком

Основные преимущества:

Высокая рабочая частота

Отсутствие управляющих элементов в потоке

Гибкость управления пространственно-временным воздействием

Основные недостатки:

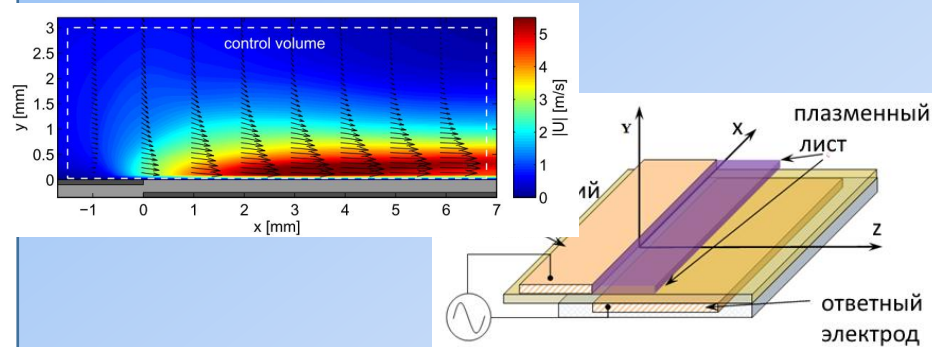
Сравнительно высокие затраты на плазмообразование

Технологическая ниша

1. Управление нестационарными течениями с помощью малых воздействий
2. Управление течением на кратковременных нерасчетных режимах
3. Управление воспламенением и горением

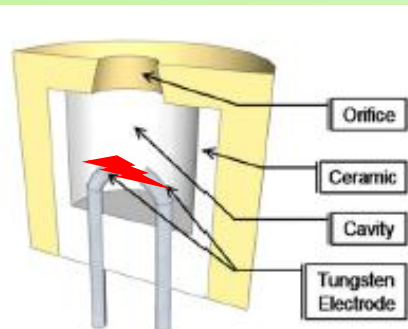
Основные типы плазменных актуаторов

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР)



Скорость ЭГД струи	до 10 м/с
Электрохимический КПД	< 0.1%
Погонная тяга	до 10^{-2} Н/м
Потребляемая мощность	10-100 Вт/м
Частота	до 100 кГц

Электроразрядные струйные актуаторы



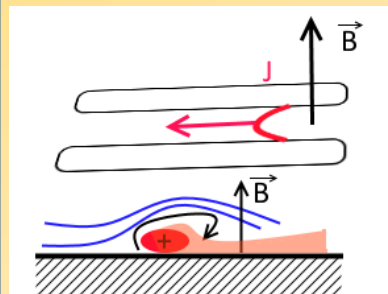
Скорость струи	до 300 м/с
Потребление	до 0.1 Дж/имп
Частота	до 500 Гц

Подвод тепла в поток для изменения обтекания (дуга, СВЧ, лазер)



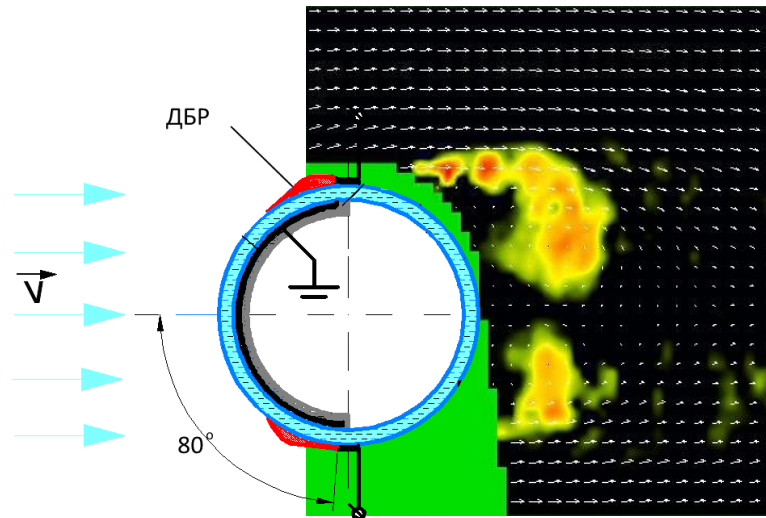
$R \sim 1-5\%$ энтальпии потока
Эффективно для сверхзвуковых течений

Актуаторы на основе комбинированного теплового и МГД эффекта

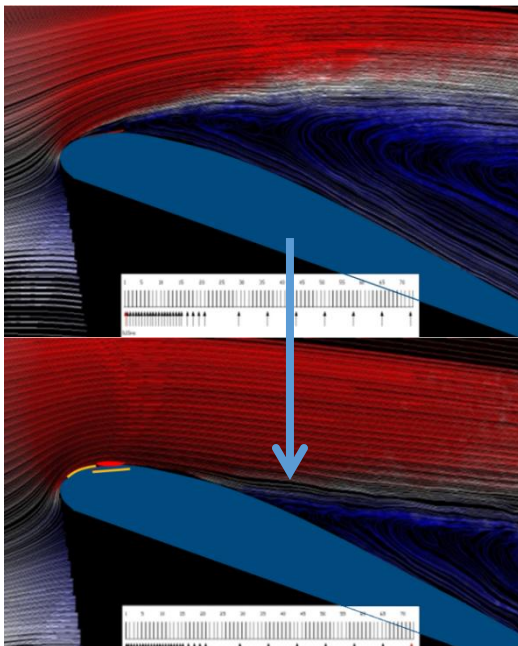
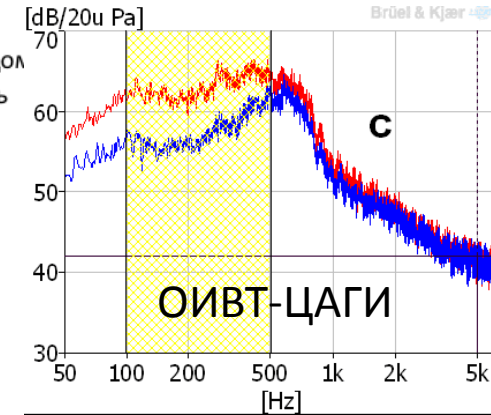
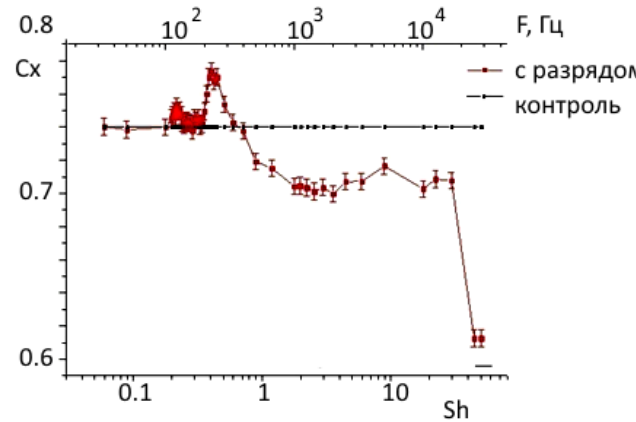


Скорость струи 300 м/с
Импульс до 100 Н
Частота до 2 кГц

Управление отрывом потока на плохообтекаемых телах



Изменение сопротивления цилиндра с частотой воздействия



контроль

с разрядом

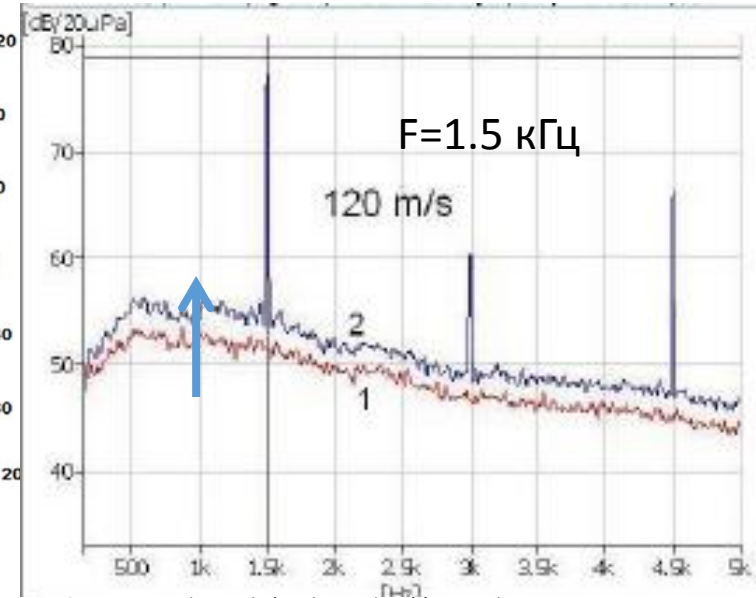
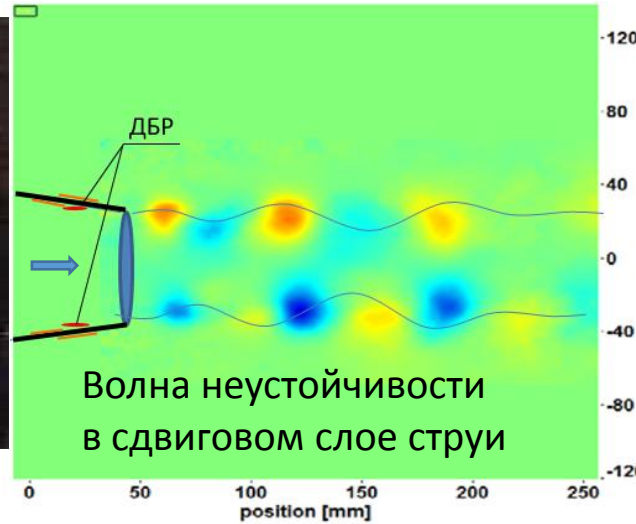
При скоростях потока V до 80 м/с и Re до $2 \cdot 10^5$ удастся управлять отрывом потока и сходом вихрей на плохообтекаемых телах (цилиндр, крыло на закритическом угле атаки) с помощью ДБР актуатора

В результате:

Снижается шум обтекания и вибрация

Снижается сопротивление тела

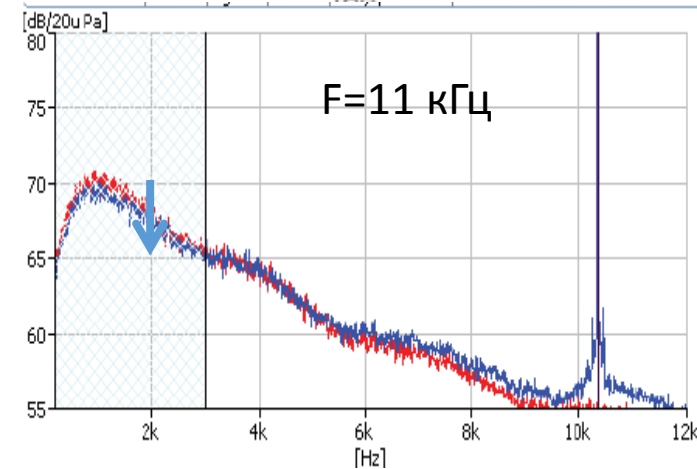
Воздействие с помощью плазменных актуаторов на акустический шум струи



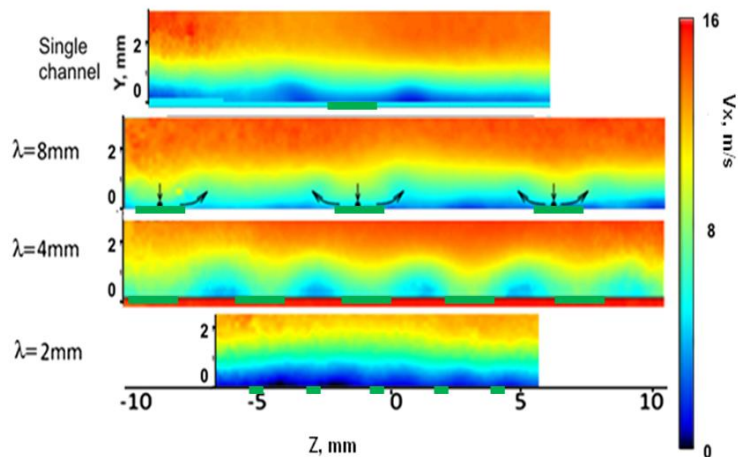
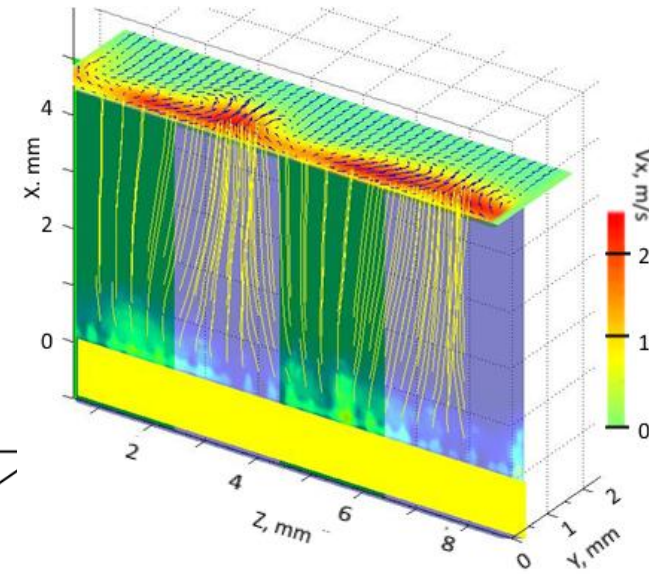
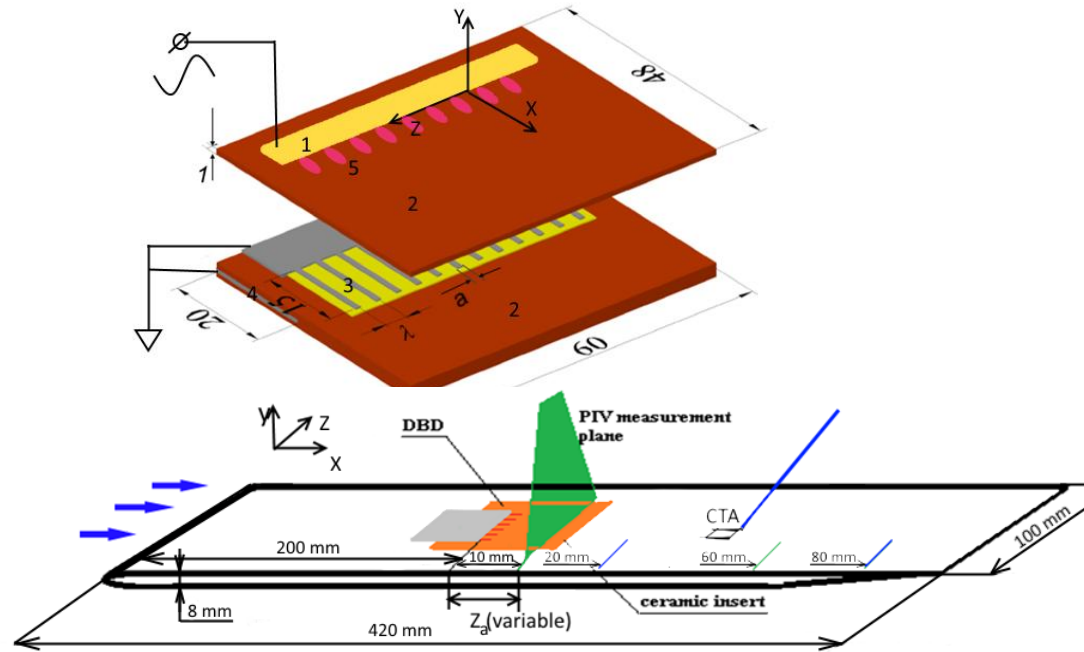
ОИВТ-ЦАГИ

Показана возможность управления возмущениями в сдвиговом слое струи при скоростях до 200м/с

Получено снижение шума на 3дБ при высокочастотном возбуждении струи



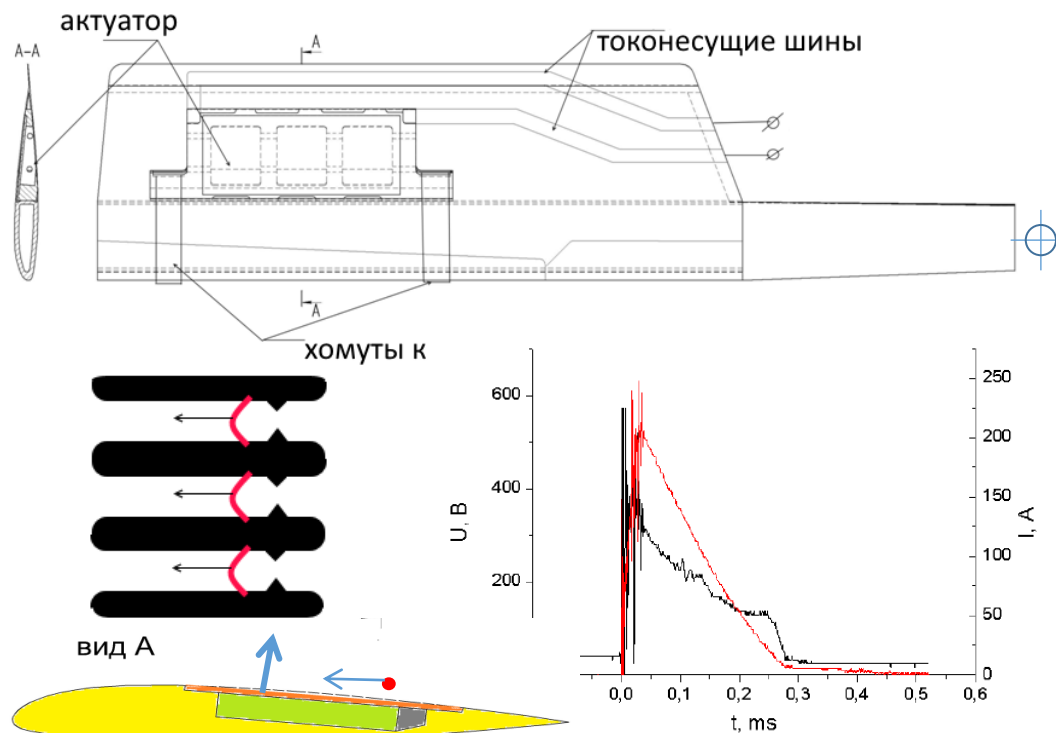
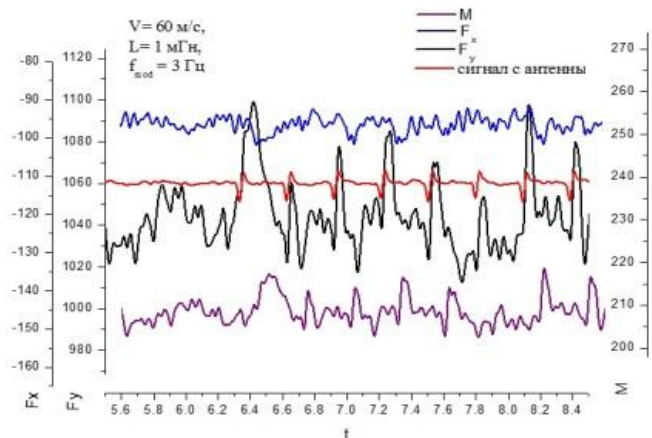
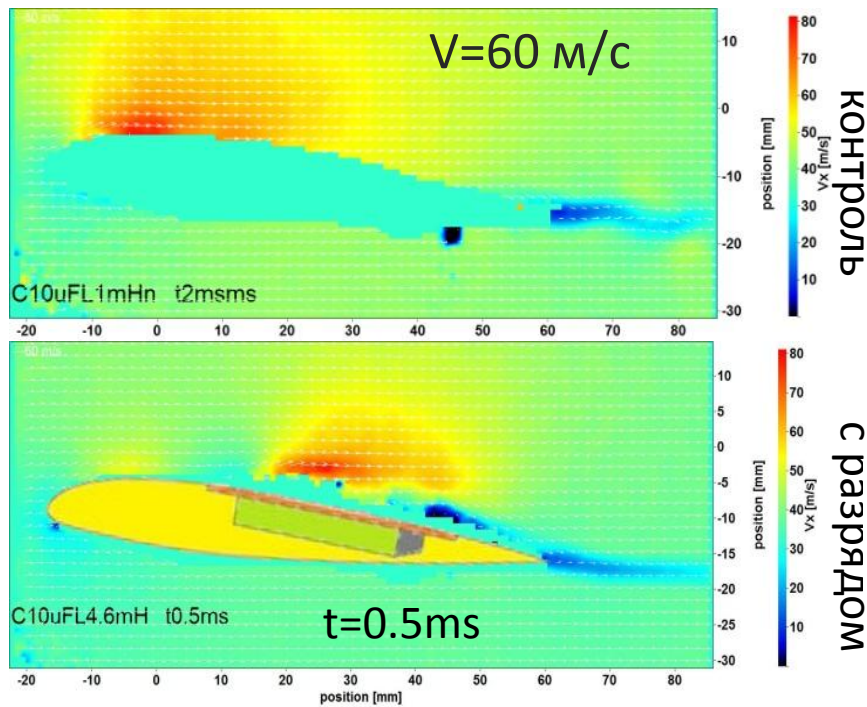
Разработка новых типов плазменных актуаторов для управления ламинарно-турбулентным переходом



Использование ДБР разрядников специальной конструкции позволяет создавать в пограничном слое гидродинамические возмущения с управляемой трехмерной структурой. Предлагается использовать эти возмущения для создания «**виртуальной шероховатости поверхности**» в задачах управления переходом

ПЛАЗМЕННЫЙ ЗАКРЫЛОК НА ОСНОВЕ МГД АКТУАТОРА

ОИВТ-МВЗ им. М.Л. Миля

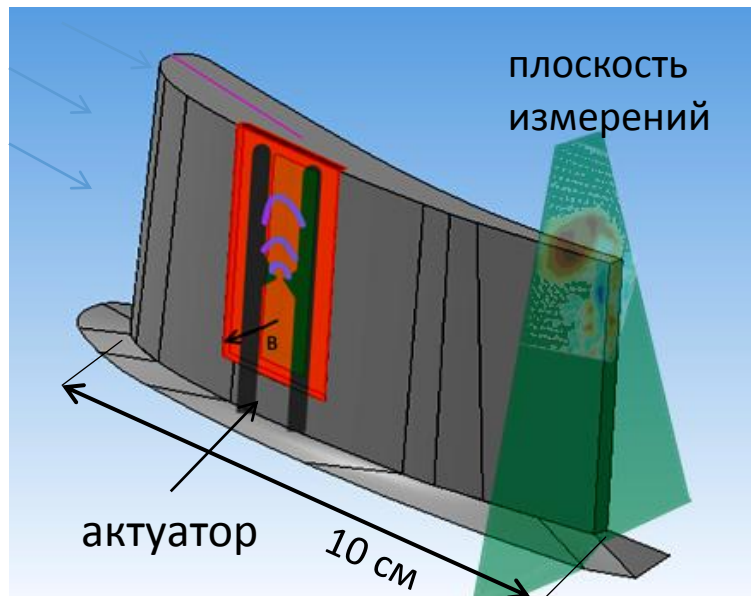


Ток разряда	200А
Пиковая мощность	100кВт
Средняя мощность	3-6кВт

Цель работы - подавление вибраций лопасти винта вертолета

Импульс МГД актуатора вызывает формирование зоны переменного давления над поверхностью тела, которое ведет к импульсной модуляции сил, действующих на модель.

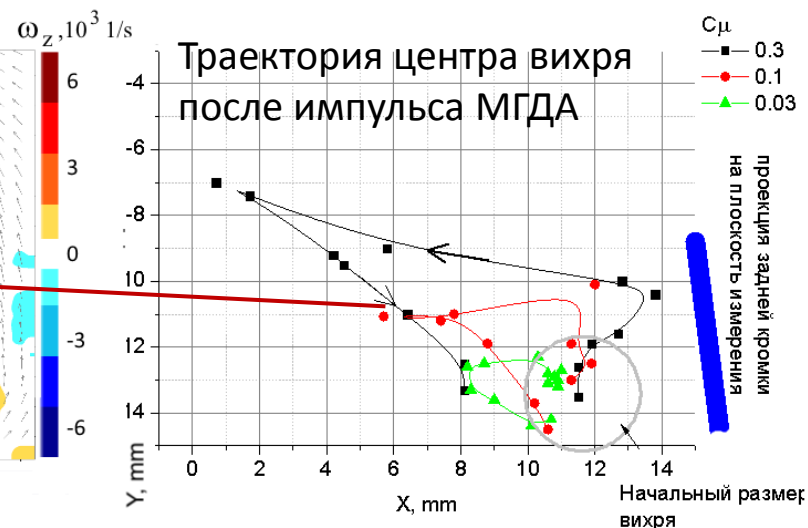
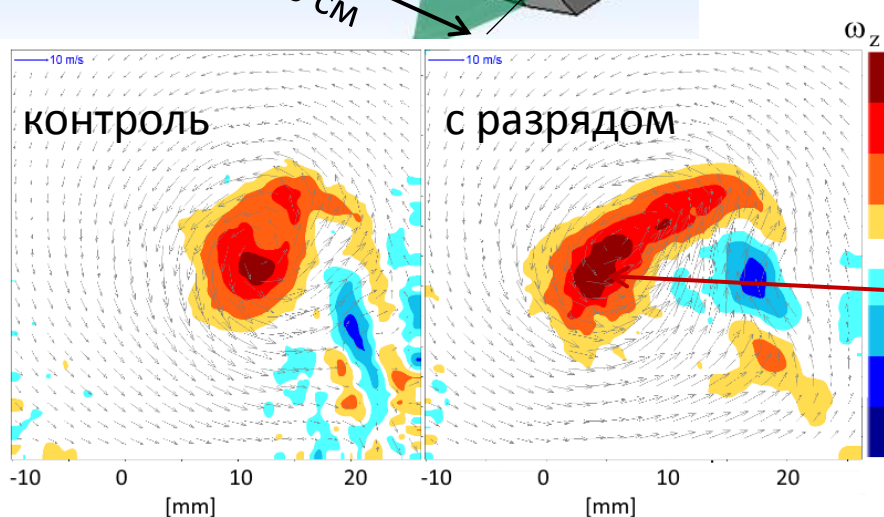
Управление структурой концевой вихря с помощью МГД актуатора



ОИВТ-ЦАГИ

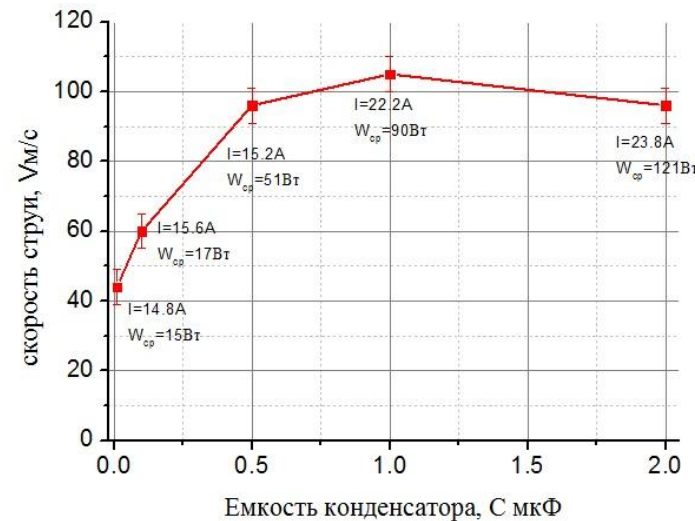
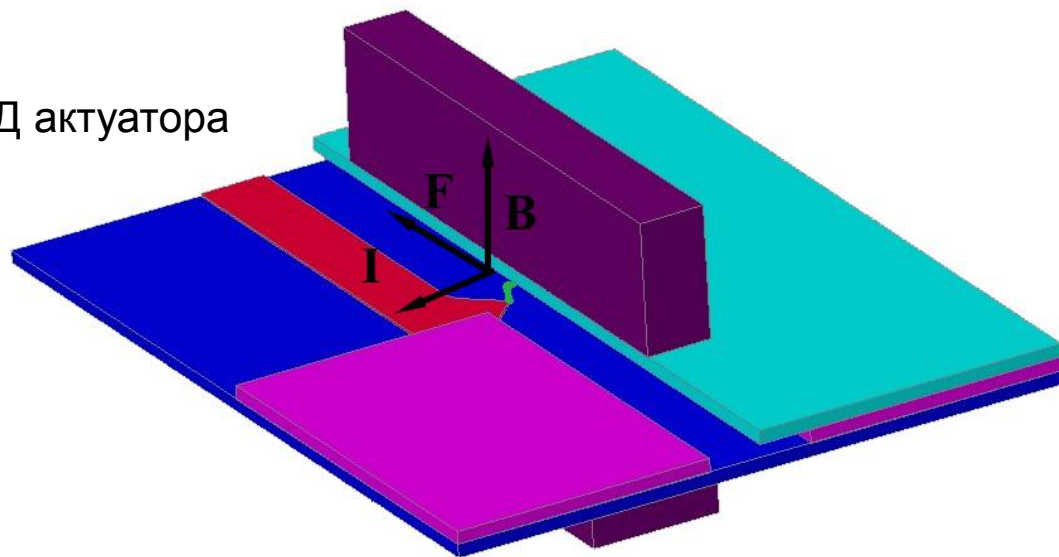
С помощью плазменных актуаторов на основе импульсной дуги в магнитном поле удается на короткое время повлиять на положение концевой вихря на крыле конечного размаха.

$$V \leq 60 \text{ м/с}, \quad I = 50 \text{ А}, \quad P_i \sim 30 \text{ кВт}$$

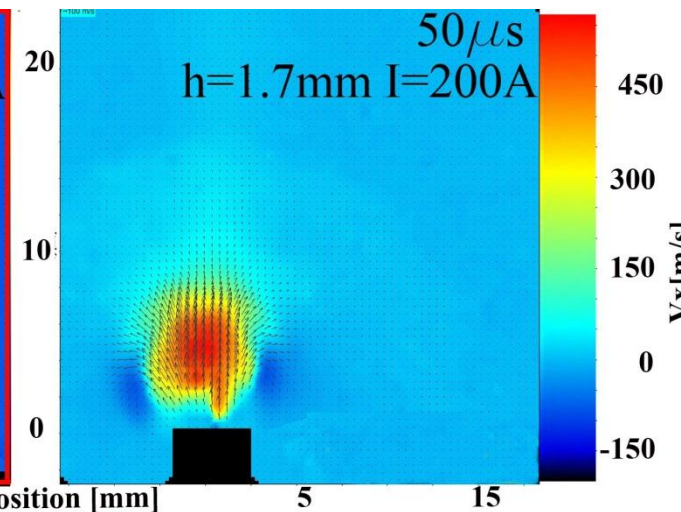
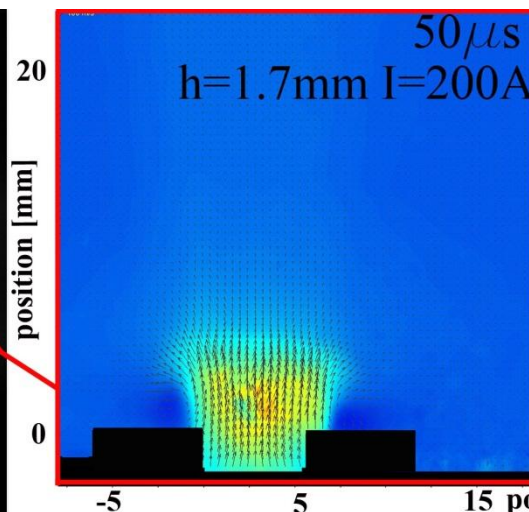
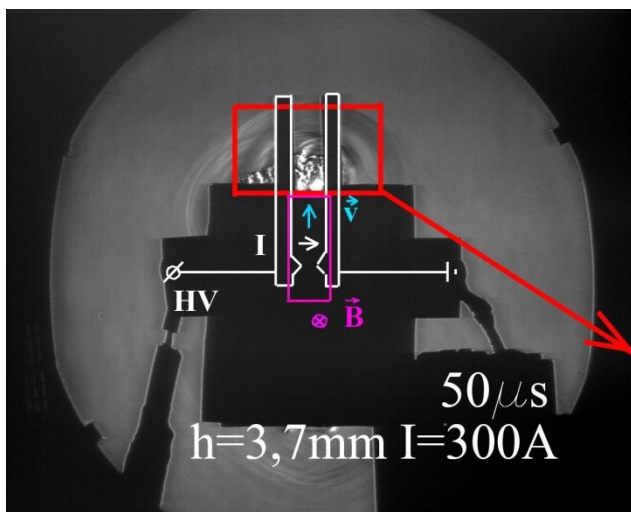


Управление потоком с помощью плазменных синтетических струй PSJ

Схема МГД актуатора



Зависимость скорости PSJ от силы тока дуги



Визуализация PSJ в эксперименте с помощью теневой схемы и методом PIV

Разработка плазменного актуатора для подавления баффета

к.ф.-м.н. А.А. Фирсов, д.ф.-м.н. С.Б. Леонов, к.ф.-м.н. Шурупов - лаб.2.2.3.2;

к.ф.-м.н. И.А. Моралёв - лаб.2.2.3.1

Разработка в ОИВТ РАН

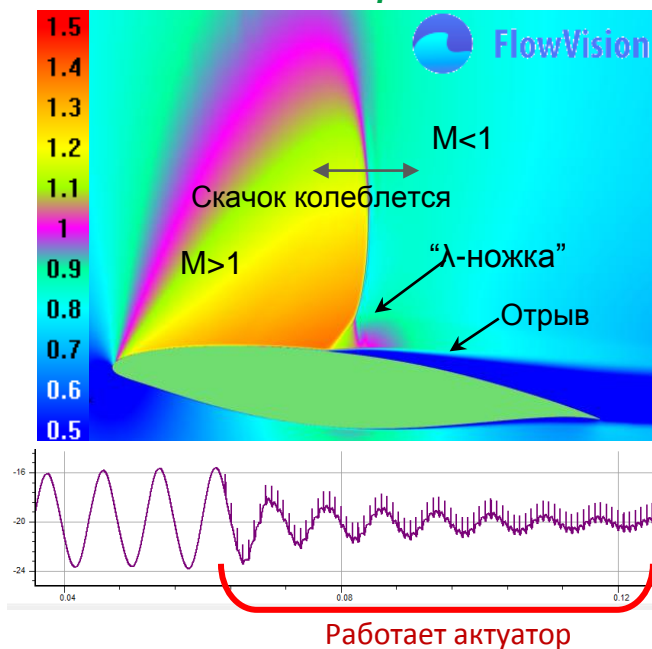
Возмущение, вызванное искрой



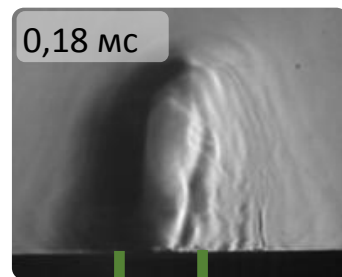
В рамках Российско- Европейского проекта BUTERFLI ведется разработка и тестирование плазменного актуатора на базе субмикросекундного искрового разряда для подавления баффета.

Баффет – колебательное движение скачка уплотнения вдоль крыла, вызывающее пульсации подъемной силы.

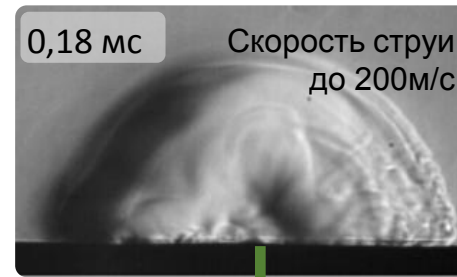
Эксперименты сопровождаются численным моделированием



Моделирование: колебания подъемной силы затухают после включения разряда.

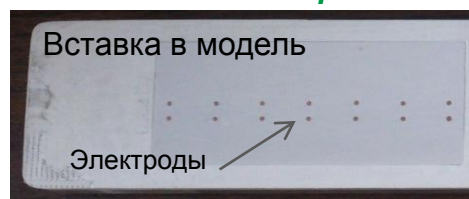


0,18 мс
Вид сбоку



0,18 мс
Скорость струи до 200м/с
Вид спереди

Тестирование в трубе Т-112 ЦАГИ

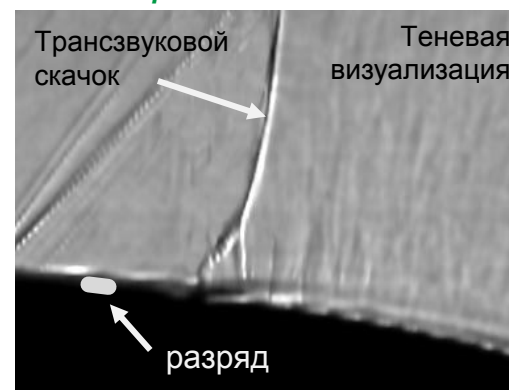


Вставка в модель

Электроды



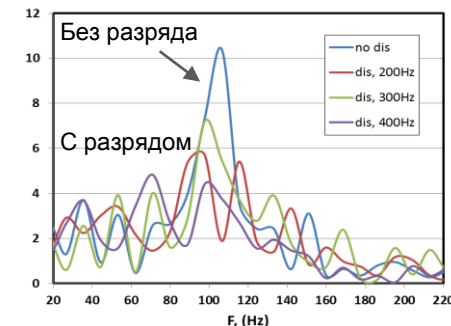
Модель в Т-112



Трансзвуковой скачок

Теневая визуализация

разряд



Спектры колебаний скачка

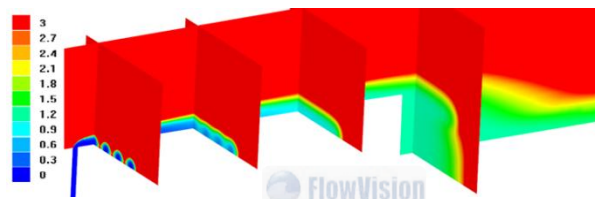
В ходе первых тестов в АДТ Т112 в ЦАГИ показано, что активация разряда приводит к снижению амплитуда баффета.

Развитие плазменной технологии зажигания и поддержания горения в переходных режимах ГПВРД

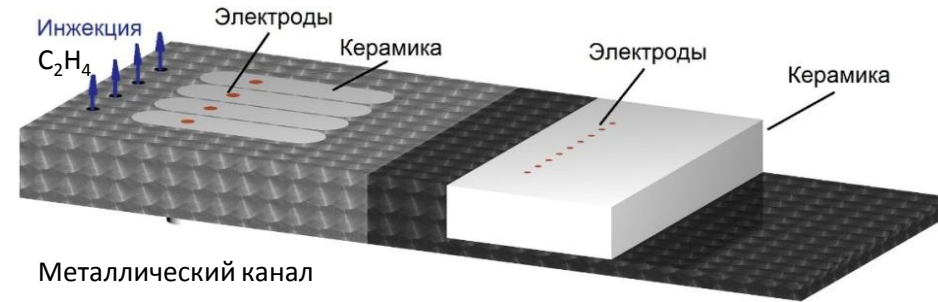
Д.А. Яранцев, к.ф.-м.н. А.А. Фирсов, д.ф.-м.н. С.Б. Леонов, лаб.2.2.3.2

В рамках программы ЦАГИ-РАН продолжают разработку и испытания схем плазменного воспламенения **углеводородного** топлива в модельных сверхзвуковых камерах сгорания. Экспериментальная работа ведётся на установке ИАДТ-50 в ОИВТ РАН и на стенде Т131В в ЦАГИ. Достигнуто воспламенение и стабилизация горения этилена в холодном потоке воздуха и **керосина** в горячем потоке воздуха в широком диапазоне параметров.

Эксперименты сопровождаются численным моделированием для оптимизации инъекции топлива.



FlowVision CFD,
3D уравнения Навье-Стокса,
модель турбулентности k-ε.
 $T_0 = 865 \text{ K}$; $P_0 = 1350 \text{ кПа}$;
 $M = 2.5$; $G_{C_2H_4} = 12.5 \text{ г/с}$.



Предварительное тестирование в ОИВТ РАН
Возможность управления режимом за счет использования распределенной схемы



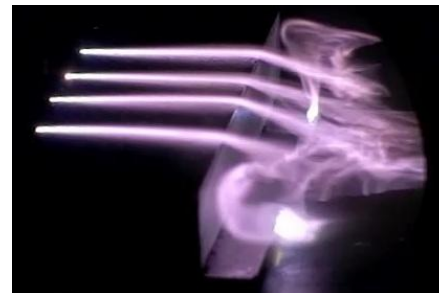
Продольный режим.



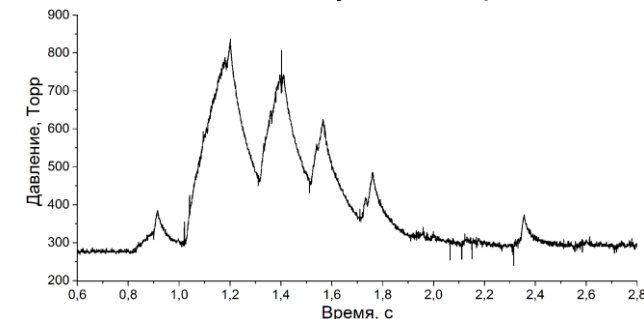
Поперечный режим.

Испытания в камере сгорания Т131В в ЦАГИ

Электрический разряд. Напряжение – $0.5 \div 1 \text{ кВ}$; Ток общий – $10 \div 20 \text{ А}$;
Мощность – $8 \div 15 \text{ кВт}$. Режимы – постоянный, импульсно-периодический.

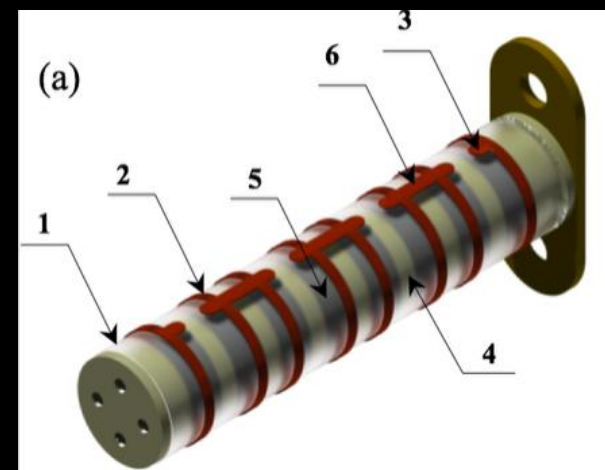
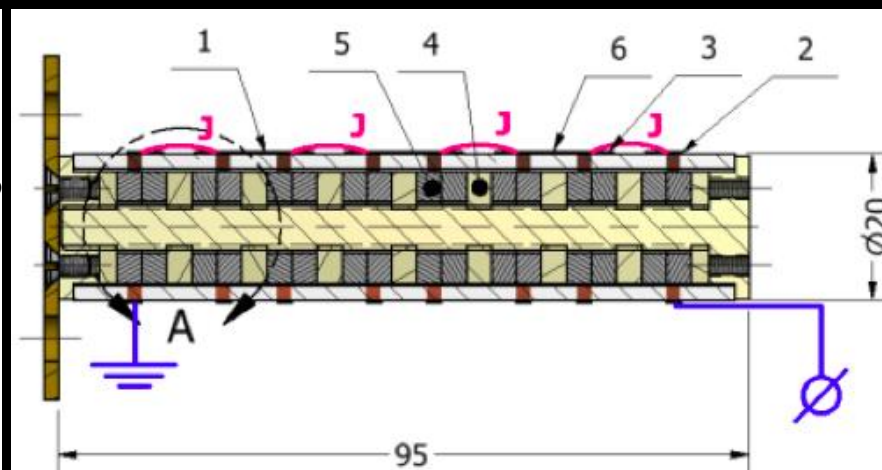
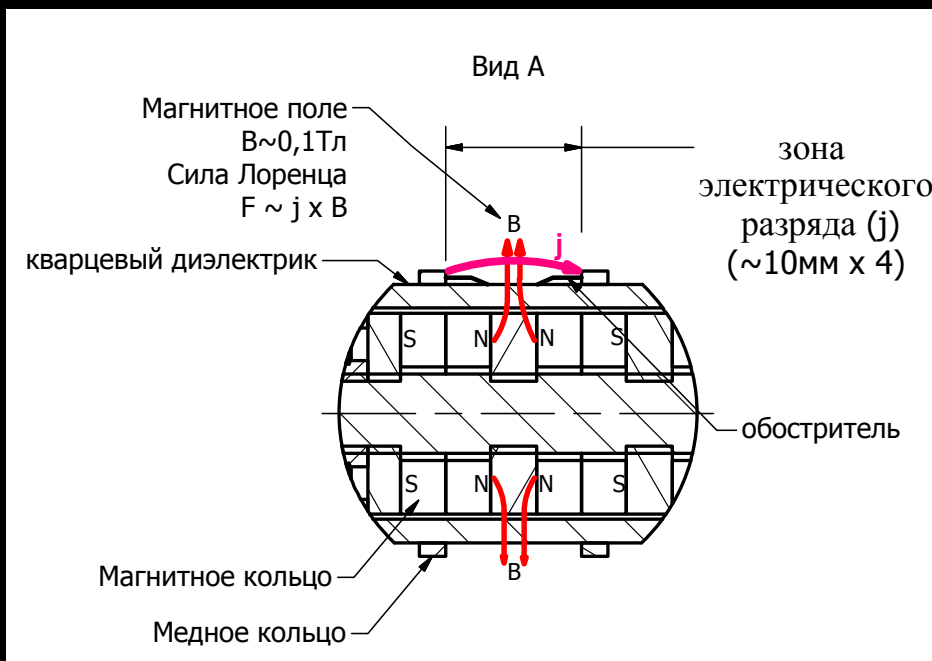


Разряд на Т131В в ЦАГИ



Давление в Т131В при горении **керосина** в потоке $M=2.5$, $T_0=700\text{K}$, при $\alpha=3.7$, воспламенённого разрядом в присутствии этилена: $G_{C_2H_4} = 10\text{г/с}$, расход воздуха в сверхзвуковом канале 1.5кг/с .

УПРАВЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ ВОКРУГ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



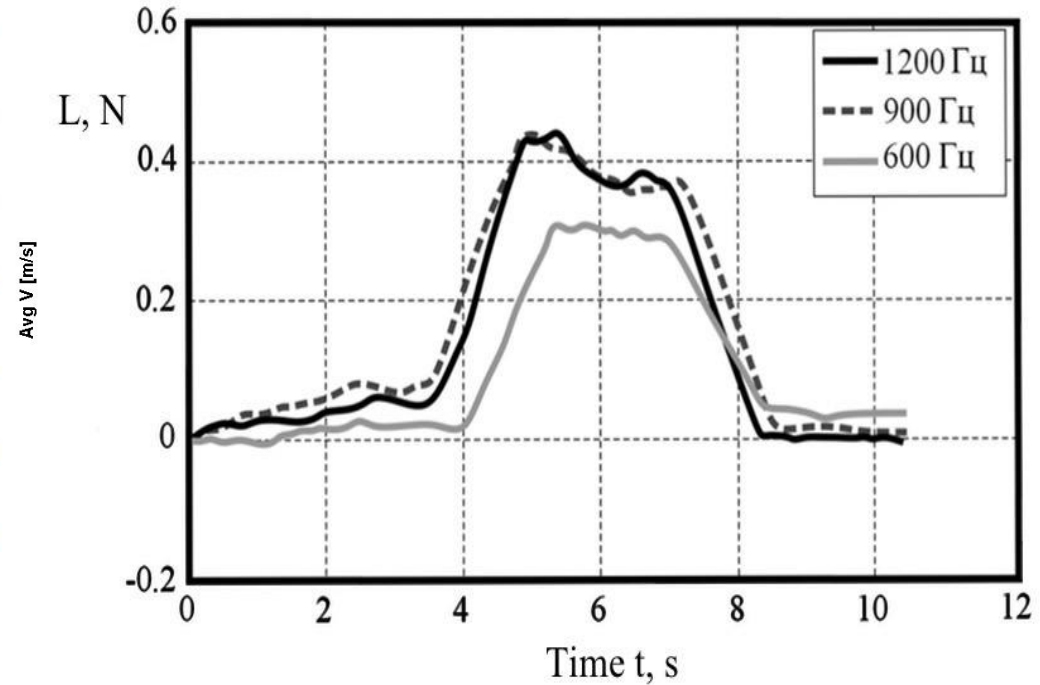
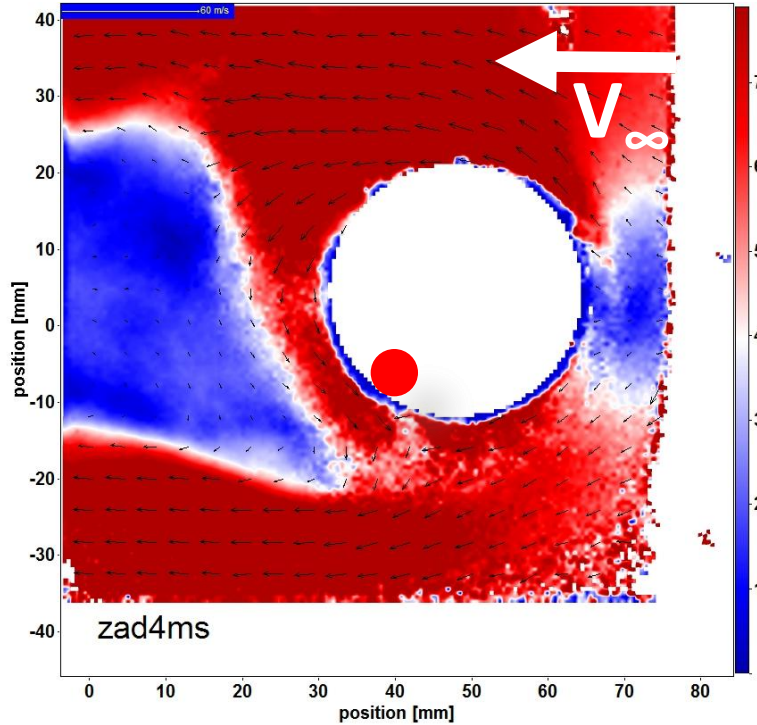
МОДЕЛЬ

Общий вид и схема цилиндрической модели с многозвенным МГД-актуатором: 1- кварцевая трубка, 2- медное кольцо, 3- обостритель, 4- диэлектрическая гайка и шпилька из полиамида, 5- Nd-Fe-B магниты, 6- соединяющая перемычка между электродными кольцами

ЗАДАЧИ

- Создание циркуляции потока вокруг цилиндрической модели с помощью МГД-актуатора
- Создание подъемной силы цилиндра за счет стимулированной циркуляции потока вокруг него
- Управление положения точки отрыва потока на модели
- Характеризация поля скоростей потока и движения электрической дуги вокруг модели с помощью высокоскоростной камеры, датчика силы, теневого и PIV методов

УПРАВЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ ВОКРУГ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



Результаты

- Измерение Усредненной PIV-картины поля скоростей вокруг цилиндра с вращающейся плазменной дугой
- Измерение подъемной силы L на цилиндрической модели при включении МГД-актуатора ($t < 3.5$ с и $t > 9$ с) и его выключении (5.5 с $< t < 7$ с) и $V_\infty = 42$ м/с

Источник сильноионизованной плотной плазмы на основе капиллярного разряда (А.С. Пащина, л.2.2.2.1)



Основные возможности

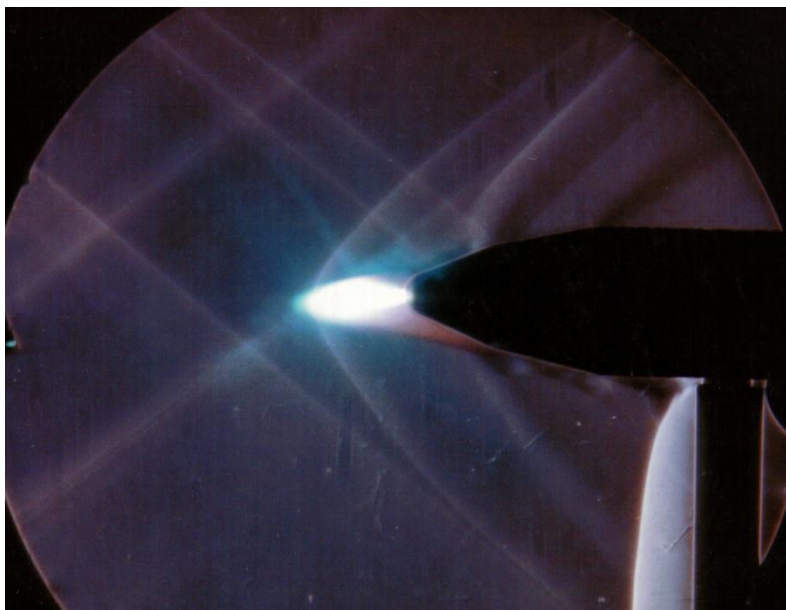
- ❑ Получение плазмы заданного химического состава в широком диапазоне давлений $p \sim 10^5 - 10^8$ Па, температур $T \sim 10 - 200$ кК и концентрации заряженных частиц $n_e \sim 10^{17} - 10^{20}$ см⁻³
- ❑ Получение узконаправленных коллимированных высокоэнтальпийных струй плазмы ($h > 10^8$ Дж/кг) с уникальными свойствами:
 - Большая дальнобойность $l/d > 200 - 500$
 - Устойчивость в потоке газа
 - Большие времена релаксации плазмы (десятки-сотни миллисекунд)
 - Избирательное взаимодействие с веществом
 - Эффективное поглощение э/м волн

Область применения

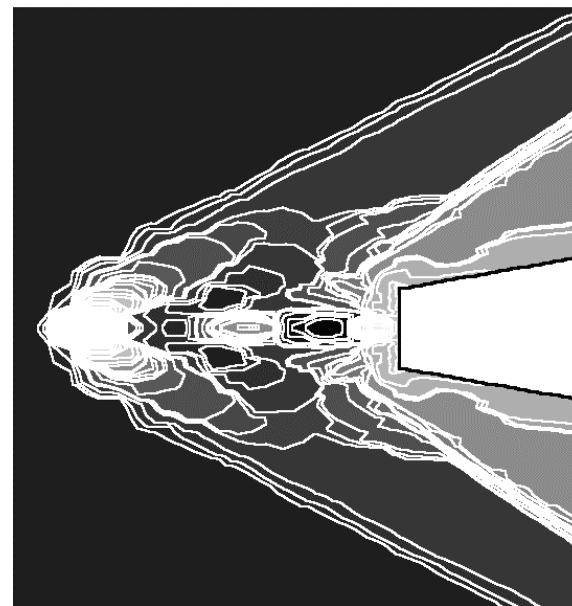
- ❑ Магнитоплазменная аэродинамика:
 - Управление параметрами потока
 - Поджиг и стимулированное горение
 - Радиосвязь
 - Управление заметностью ЛА
- ❑ Мощные источники оптического и УФ излучения
- ❑ Получение и исследование плазмы в экстремальном состоянии
- ❑ Лазеры ВУФ и мягкого рентгена
- ❑ Фокусирующие системы лазеров
- ❑ Двигатели КЛА
- ❑ Плазменные промышленные технологии (резка, сварка, перфорация, нанопленочные технологии) и др.

Плазменная струя в сверхзвуковом потоке

Эксперимент (ГосНИИАС)



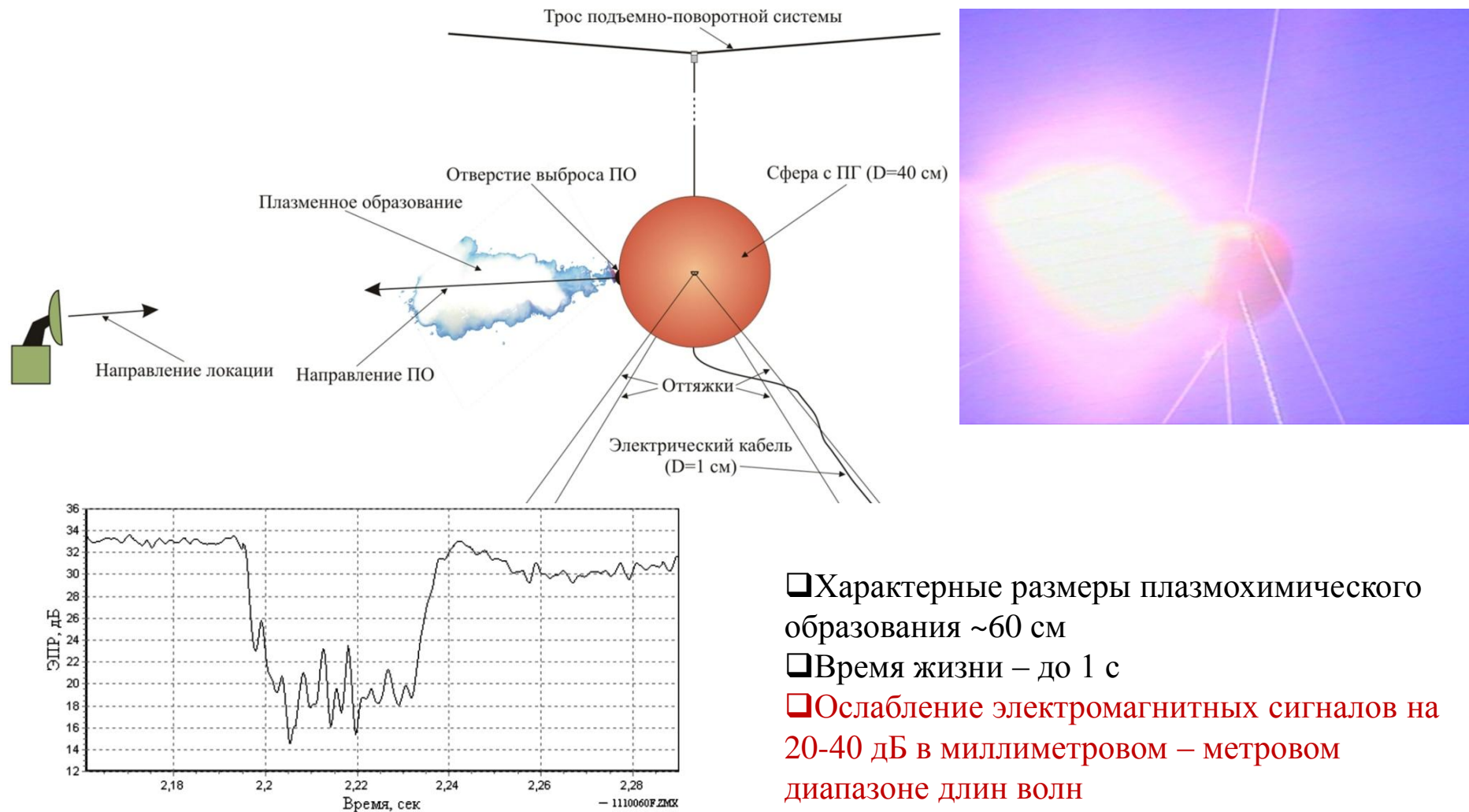
Расчет (ИТПМ СО РАН)



Основные возможности:

- Изменение структуры течения
- Снижение аэродинамического сопротивления (>40%)
- Снижение тепловых нагрузок
- Управление положением и параметрами пристенного плазменного слоя в условиях гиперзвукового полета

Полигонные испытания макета плазмохимического генератора на Эталонном Радиолокационном Измерительном Комплексе 2 ЦНИИ МО РФ

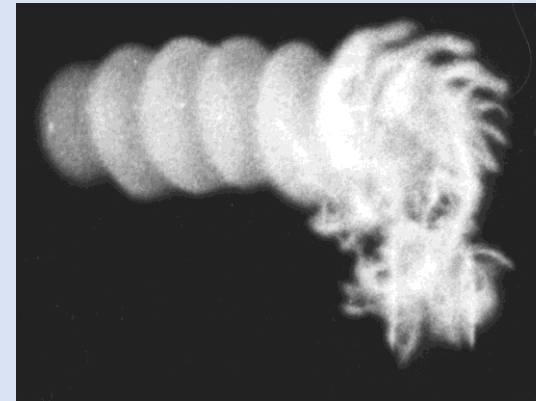
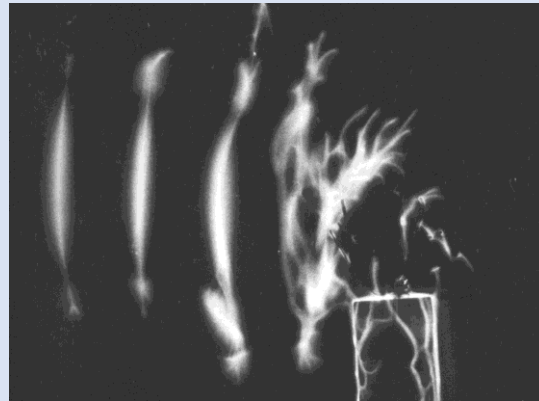
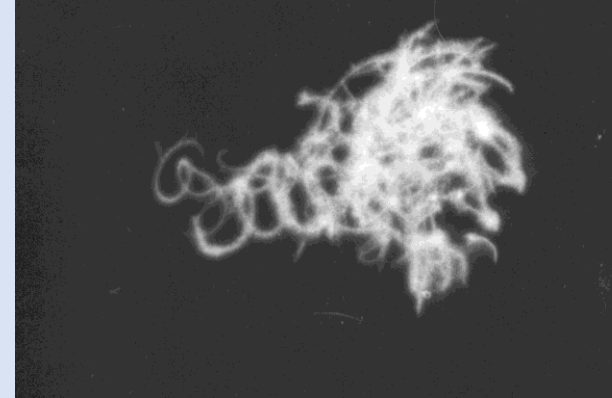
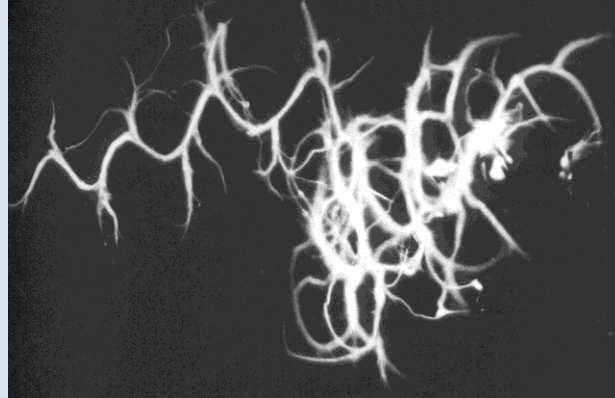


СВЧ-излучение - свойства и возможные преимущества

- *Дистанционное воздействие и передача энергии со скоростью света в заданную область*
- *Электронное управление фокусировкой СВЧ луча, его позицией и траекторией*
- *Высокий КПД СВЧ генераторов*
- *Высокая эффективность создания энергетических зон в открытом пространстве посредством совмещения СВЧ и лазерного излучения. Инициация СВЧ разрядов с помощью лазерного луча или искры.*
- *Интенсивное воздействие СВЧ импульса на газодинамику плазменных струй*

СВЧ РАЗРЯДЫ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Структура разрядов антенного типа



Линейно поляризованное СВЧ излучение

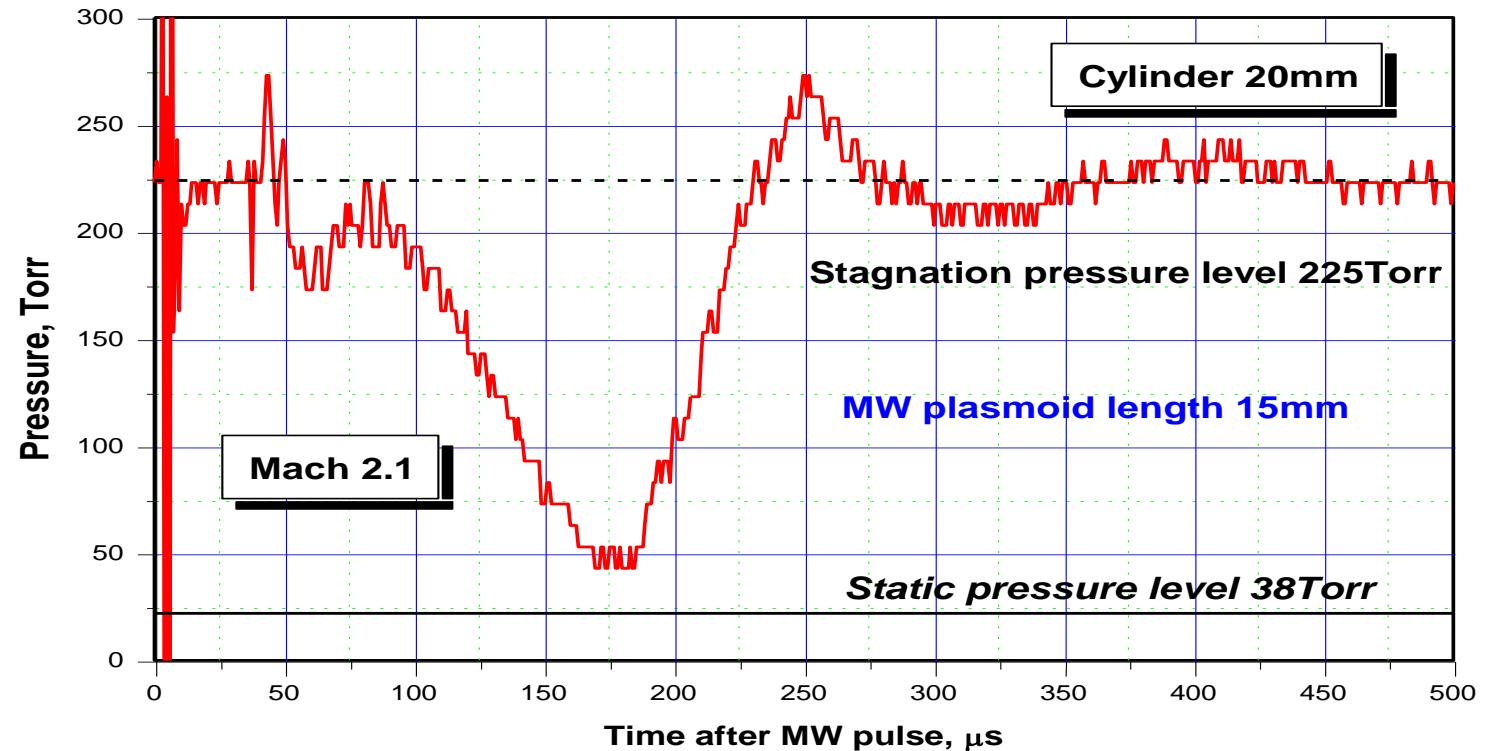
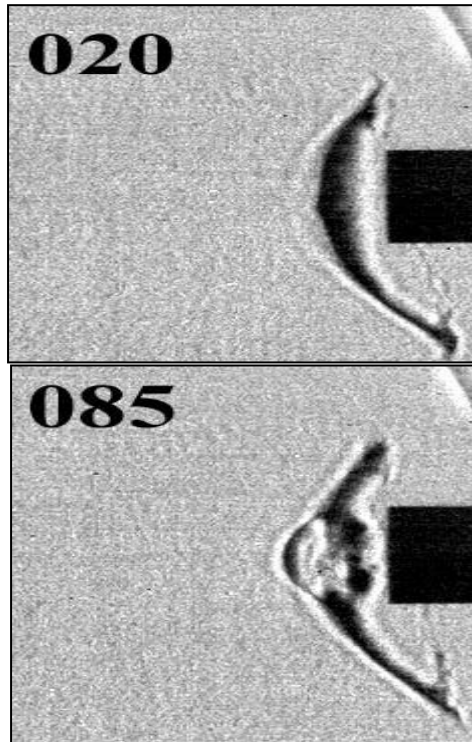
- Четверть-волновая синусоида и полу-волновые диполи в плане векторов E и k
- Форма и размеры оптимальны для приёма СВЧ энергии

СВЧ излучение круговой поляризации

- Спираль соответствующей поляризации и полу-волновые круги в плане перпендикулярно к вектору k
- Форма и размеры оптимальны для приёма СВЧ энергии

СВЧ разряд в плазменной аэродинамике

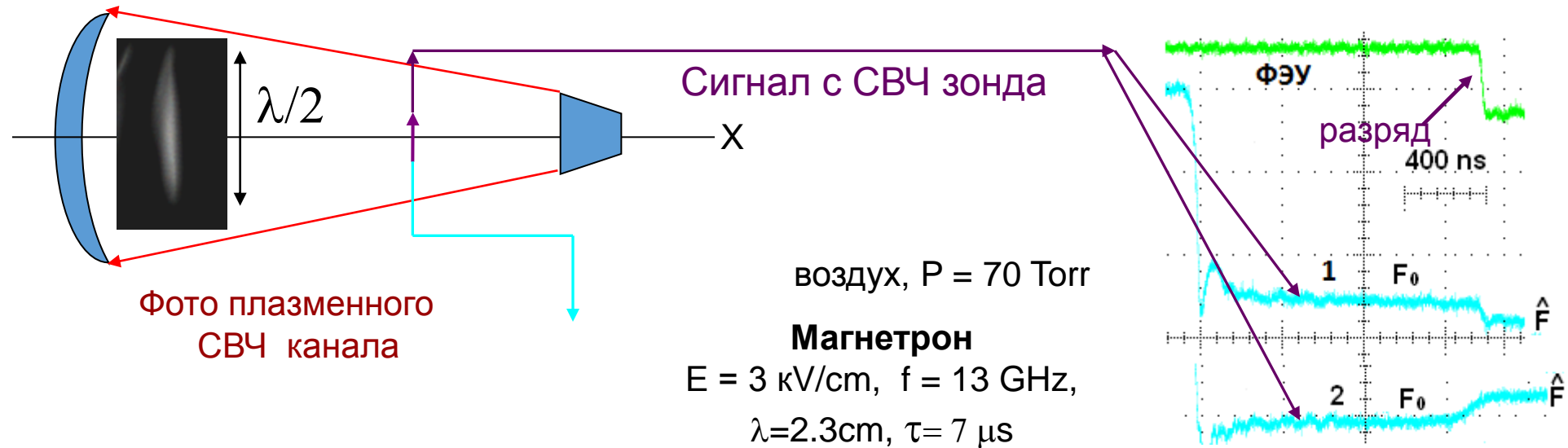
Взаимодействие СВЧ плазмоида дипольного типа с присоединённой УВ



Измерение давления в точке торможения

Поток воздуха с числом Маха $M = 2.1$,
Диаметр струи 60мм,
Импульсное СВЧ излучение - 195kW,
длительность импульса - 1.5 μs ,
Длина СВЧ плазмоида – 20мм.

НОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РАССЕЯННОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ



На основании экспериментальной информации о **дипольном моменте** плазмоида получены:

- значение радиолокационного сечения плазмоида $\sim 0.58 \text{ см}^2$, что примерно в **7.5 раз меньше**, чем у полуволнового металлического вибратора;
- амплитуды полного заряда и усредненного по длине канала тока - **0.1 нС и 7 А**;
- значения усредненных по объему электронной проводимости и концентрации порядка $\sim 9 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и 10^{14} см^{-3} ;
- поглощаемая СВЧ каналом мощность $W \approx 17 \text{ кВт}$.

Предложен и применён новый способ диагностики тонкого (радиус $\ll \lambda$) плазменного СВЧ канала по рассеянному микроволновому излучению в воздухе в диапазоне давлений (70 -120)Торр.

ВЫВОДЫ

1. Работа развивается в целом успешно. Поучены новые результаты как по физике используемых типов разряда, так и по их применению в воздушных потоках
2. Разработаны новые виды актуаторов и продемонстрирована их работоспособность в условиях, близких к реальным
3. Накопленный в рамках выполнения работ по теме фундаментальных исследований опыт востребован в профильных учреждениях при разработке новых образцов техники
4. Проблемы финансирования исследований особенно в части развития экспериментальной базы и современных средств диагностики, а также повышения производительности вычислительных систем остаются критически важными – решить их за счет внутренних ресурсов невозможно!
5. К настоящему времени, по-видимому, сформировался круг практических проблем, которые следует решать методами магнитоплазменной аэродинамики

МГД актуатор для управления характеристиками рулевого винта вертолета

• ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

- Целью работы является разработка активного закрылка на рулевом винте вертолета методами плазменной аэродинамики.
- Задачей данного этапа работы была подготовка и проведение демонстрационных испытаний МГД актуатора на винтовом аэродинамическом стенде МВЗ им. М.Л. Миля.

Этапы

- Обобщение результатов лабораторного этапа экспериментального исследования возможности управления обтеканием с помощью актуатора на двумерном профиле NACA23012
- Подготовка рулевого винта для стендовых исследований
- Результаты испытаний актуатора на рулевом винте вертолета
- Расчетно-теоретический анализ экспериментальных данных

Обобщение результатов лабораторного этапа экспериментального исследования возможности управления обтеканием с помощью актуатора на двумерном профиле NACA23012

В ходе лабораторного этапа было проведено предварительное исследование влияния МГД актуатора на обтекание профиля NACA 23012 с хордой 80мм при скорости потока до 60м/с.

С помощью МГД актуатора, установленного в области 0.8-0.35% хорды, получена модуляция силы и момента, действующих на профиль.

В эксперименте при работе актуатора на верхней поверхности профиля наблюдается рост значений подъемной силы, а также величины момента сил, действующих на лопасть.

При скорости потока 60м/с изменение средних величин составляет $dC_x < 2,8\%$, $dC_y < 6\%$, $dM < 7,2\%$, амплитуда колебаний подъемной силы и момента достигает 10%.

Визуализация течения показывает, что движение дуги по поверхности модели навстречу потоку сопровождается торможением потока перед ней и формированием каверны за каналом разряда.

Тепловыделение в дуге должно приводить к повышению давления перед каналом дуги, формирование каверны - к оттеснению линий тока от стенки, и падению давления в области каверны.

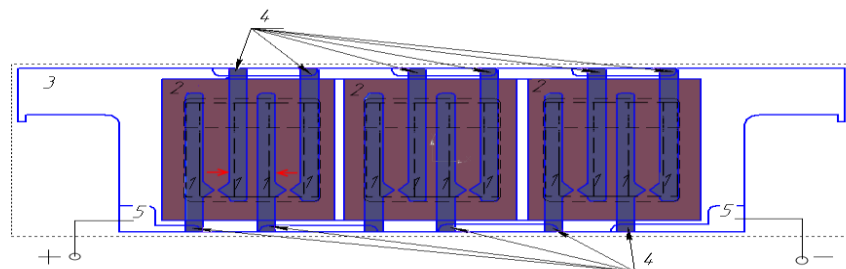
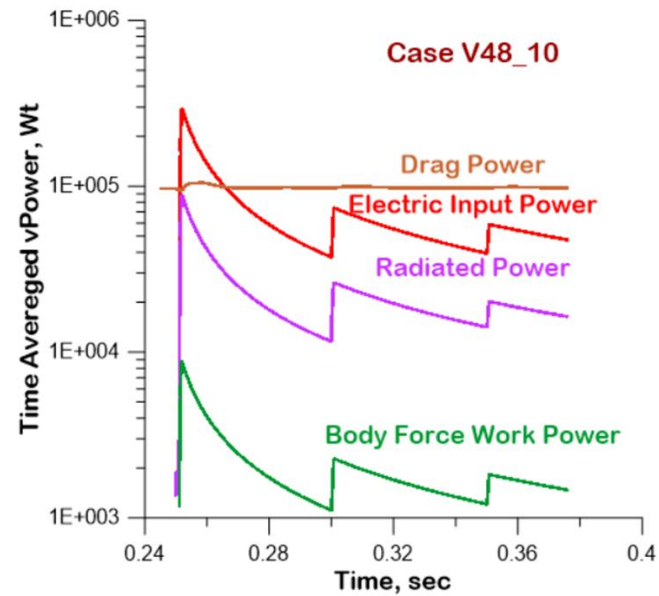
Демонстрационные испытания МГД актуатора на аэродинамическом стенде ЭИК МВЗ им. М.Л. Миля

Для проведения испытаний:

- разработана конструкция МГД актуатора, выдерживающая длительную перегрузку, доработана конструкция магнитной системы и электродного узла,
- разработана (совместно со специалистами МВЗ) схема монтажа вставки в лопасть рулевого винта и размещения на ней токонесущих шин
- разработан и изготовлен силовой токосъемник для подведения силовых импульсов к винту

Демонстрационные испытания МГД актуатора на аэродинамическом стенде ЭИК МВЗ им. М.Л. Миля

Численное моделирование характеристик обтекания профиля при воздействии МГД актуатора



Фотография лопасти винта с установленными плазменными актуаторами на стенде

МГД актуатор для управления характеристиками рулевого винта вертолета

Предварительные результаты численного моделирования

1. При использовании двумерной нестационарной ламинарной модели течения газа во внешних электрических и магнитных полях, достаточно точно моделирующей условия как лабораторных, так и стендовых исследований, достигнуто хорошее качественное соответствие экспериментальным данным;
2. В условиях положительных изменений характеристик обтекания, установленных в эксперименте, численное моделирование показало снижение подъемной силы и увеличение сопротивления;
3. Полученные в численном моделировании осредненные по периоду воздействия МГД актуатора изменения подъемной силы лежат в требуемом диапазоне ($\sim 10\%$);
4. Энергетическая цена возмущений подъемной силы высока и превосходит осредненную мощность основного двигателя винта (оцениваемую как мощность работы силы сопротивления);
5. Установленные слабозатухающие колебания интегральных газодинамических характеристик обтекания профиля при использовании импульсно-периодических воздействий МГД актуатора представляются весьма перспективными для разработки «резонансной» технологии использования МГД актуаторов.

Разработка программно-аппаратных средств (ПАС) нового поколения для выполнения НИОКР по разработке ГЛА

ОИВТ – Московский институт теплотехники

Направления работ

Моделирование и анализ характеристик ГПВРД

Моделирование и анализ характеристик ГЛА

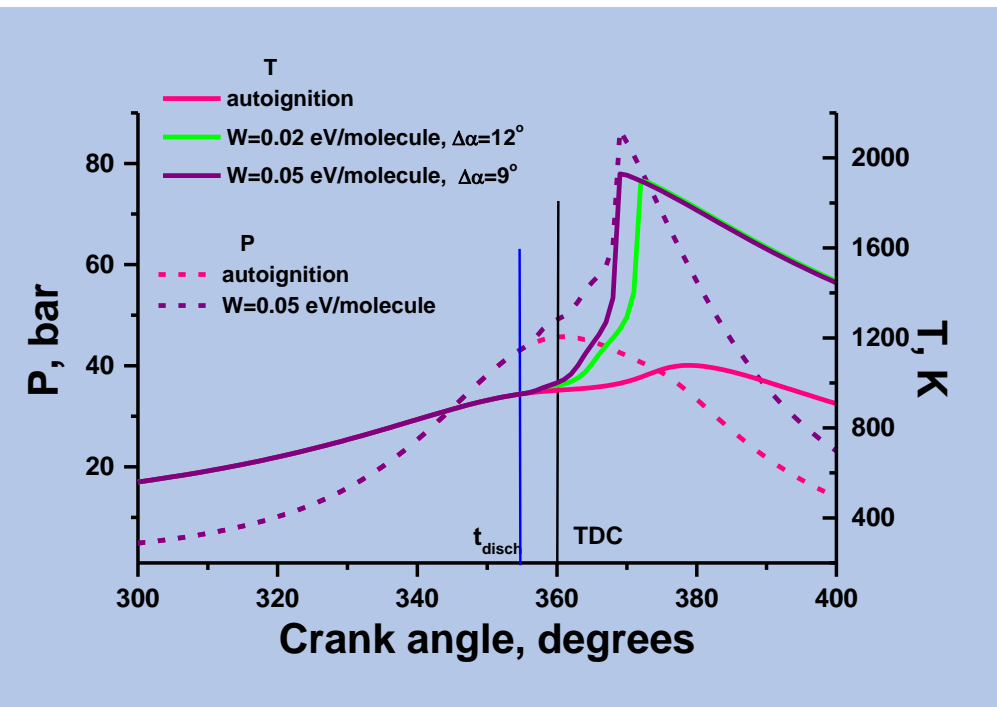
Моделирование и анализ процессов плазмообразования/плазмогашения

Моделирование и анализ процессов прохождения ЭМ-волн

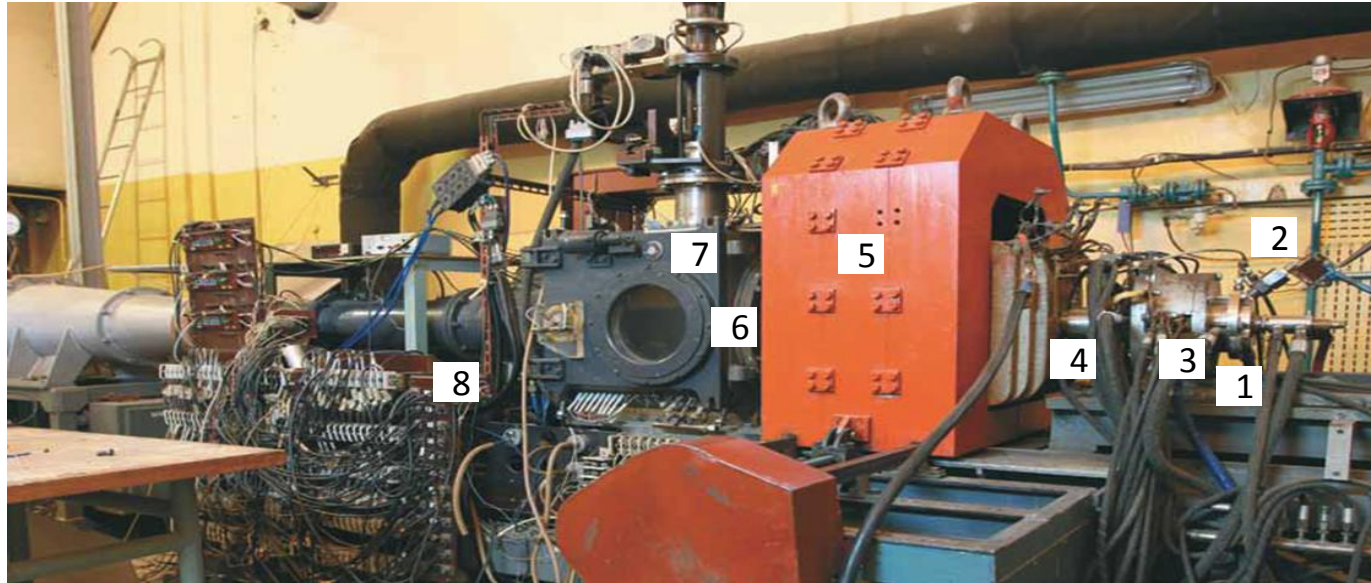
НЕРАВНОВЕСНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД ДЛЯ СТИМУЛИРОВАНИЯ МНОГОСТАДИЙНОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Разработка нового двигателя внутреннего сгорания на основе компрессионного сжатия, работающего на бедных гомогенных или частично перемешанных смесях. Химико-кинетическая особенность таких топливных смесей – наличие многостадийного воспламенения, т.е. присутствие стадий холодного, голубого и горячего пламени. Поскольку в бедных смесях наблюдается нестабильное горение (пропуски воспламенения в рабочем цикле), предлагается использовать неравновесный электрический разряд для управления горением при стимулированном многостадийном воспламенении с целью частичного выделения энтальпии смеси. В зависимости от момента включения разряда и удельного энерговклада можно ликвидировать пропуски воспламенения и управлять временем задержки воспламенения за верхней «мертвой точкой».

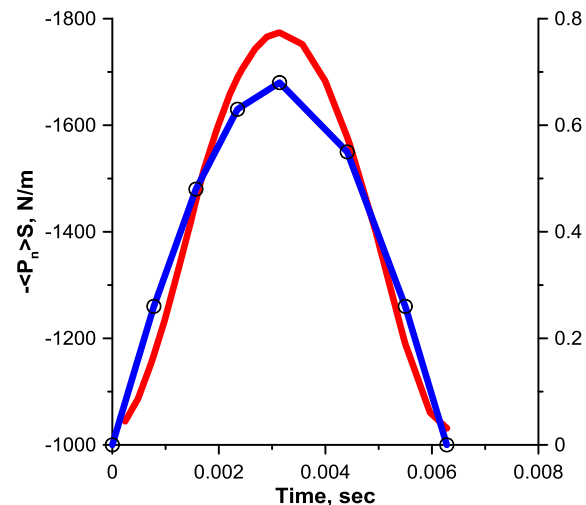
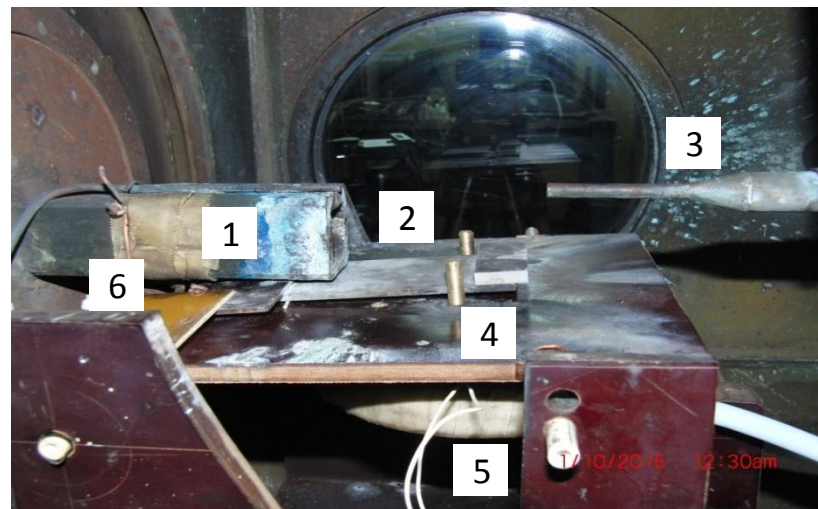
Эволюция температуры в цилиндре двигателя внутреннего сгорания с компрессионным сжатием для бедной смеси **воздух + (90% C_3H_8 +10% C_4H_{10})**, $f=0.5$, $T_0 = 380$ K



ОИВТ – ЦАГИ: МГД управление потоком



- 1 – air arc preheater
- 2 – K-Na additive lead-in
- 3 – mixing chamber
- 4 – primary nozzle
- 5 – MHD accelerator with magnet and up 60 pair of electrodes
- 6 – outlet nozzle
- 7 – working section
- 8 – supersonic outlet diffuser

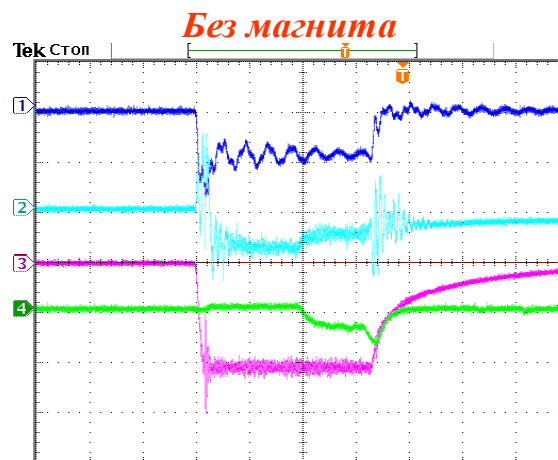
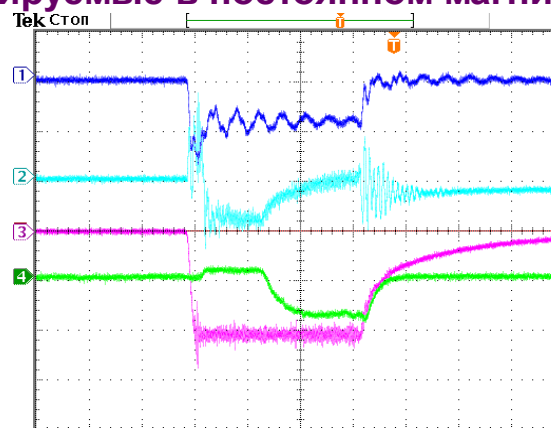


Увеличение среднего сопротивления обтекаемого тела в течение импульса магнитного поля

Взаимодействие СВЧ излучения с плазменными слоями в магнитном поле

В рамках гособоронзаказа совместно с ОАО Корпорация МИТ в НИЦ-2 открыто новое направление работ по изучению прохождения СВЧ излучения через плазменные слои, формируемые в постоянном магнитном поле.

Анализ возможности использования постоянного магнитного поля B_0 для значительного улучшения прохождения микроволнового излучения через слой плотной плазмы было осуществлено в рамках 1D модели. В результате расчётов установлено, что при параллельной ориентации векторов B_0 и k для **увеличения сигнала**, ослабленного в плазменном слое толщиной (0.5-1)см на 20дБ, **требуется магнитное поле порядка ≈ 1 Т.**



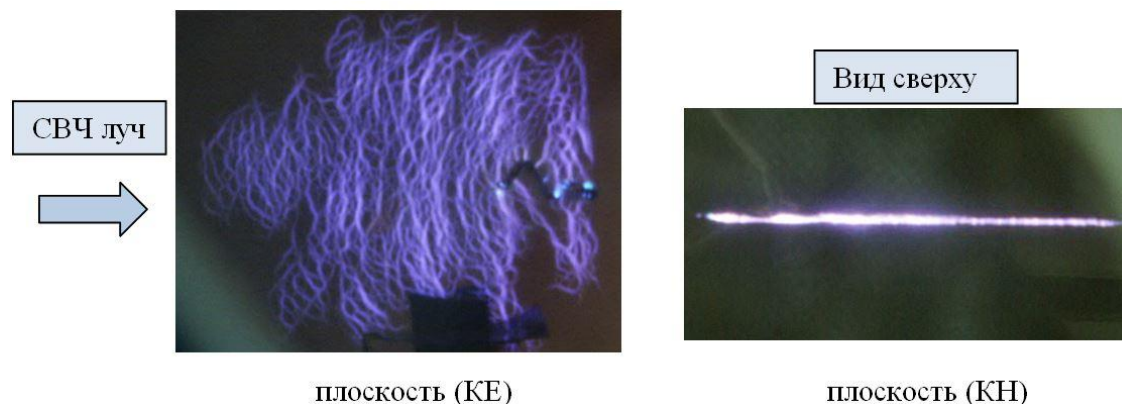
С магнитом

В экспериментах магнитное поле создавалась посредством кольцевого магнита (90×60×5мм и $B_0 \sim 0,2$ Т). СВЧ волна ($\lambda=2,3$ см) амплитудой $E \sim 3$ кВ/см свободно проходила вдоль оси магнита.

СВЧ разряд дипольного типа в виде одного-трёх плазмоидов также формировался на оси магнита. Прошедший сигнал (голубой на осциллограммах) фиксировался антенной за магнитом. Без магнита сигнал к концу импульса спадает до нулевого уровня, а при включении магнита его амплитуда эксперимента **восстанавливается до (50-70)%.**

Моделирование плазменных слоев применительно к задачам гиперзвукового полета и проблемы радиопрозрачности пристенной плазмы

Поверхностный СВЧ разряд



Направления исследований

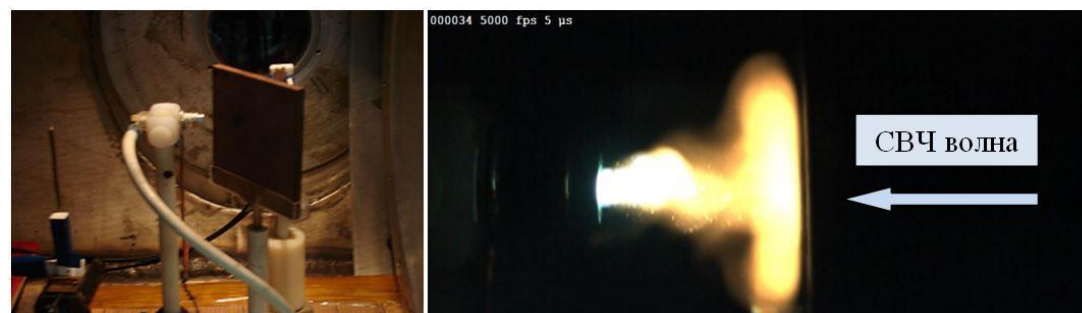
□ Поиск и изучение методов управления параметрами пристенной плазмы для:

➤ формирования «окон радиопрозрачности»

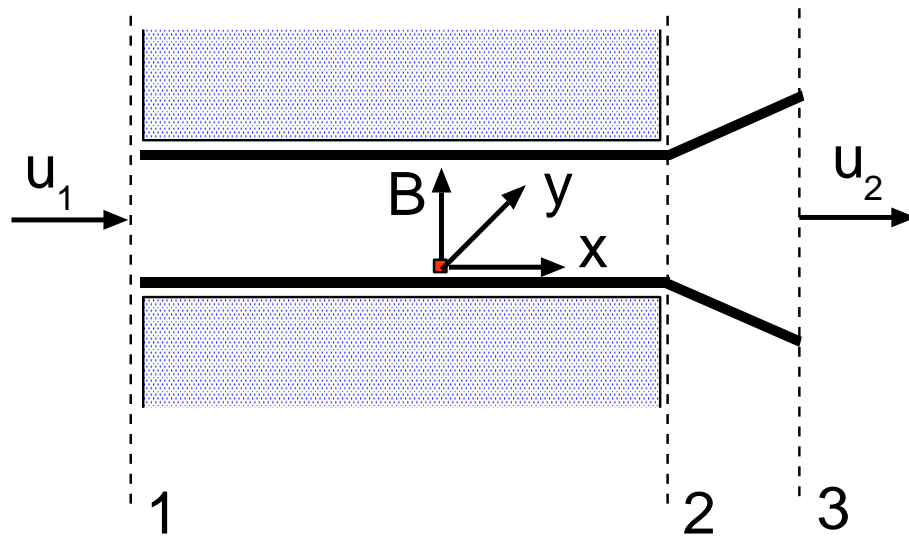
➤ снижения тепловых нагрузок

□ Отработка технических решений, элементов, узлов и оборудования гиперзвукового стенда СМГДУ ЦАГИ

Импульсная плазменная струя



ОИВТ – ЦАГИ: модернизация СМГДУ для исследования теплозащитных покрытий



Цель:

создание в тестовой секции высокоэнтальпийного потока для исследований теплозащитных покрытий

Magnetic field	B, T	2.4
Air flow rate	$G, g/s$	15
Inlet stagnation pressure	$P01, atm$	2.5
Inlet stagnation temperature	$T01, K$	2800
Inlet Mach number	$M1$	2.3