

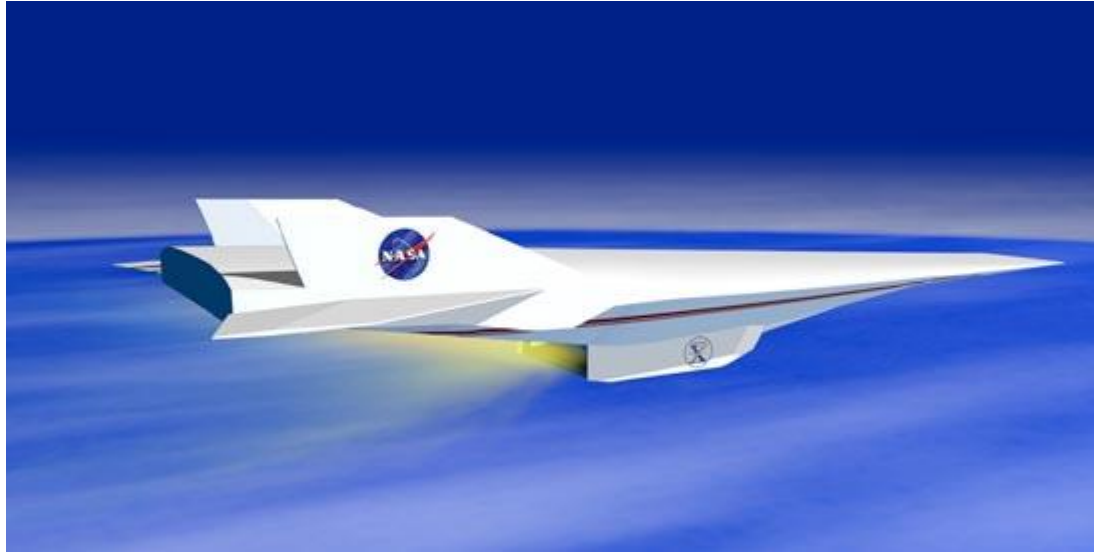
**24-й ОБЩЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО ДИОДНОЙ
ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ им. А.М. Прохорова (ДЛС-24)
27 апреля 2016 г.**

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВОСПЛАМЕНЕНИЮ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА
С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА –
ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ**

Д.А. Яранцев

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Мотивация работы: Проблемы ГПВРД



- Потери полного давления в камере сгорания при использовании механических стабилизаторов пламени.
- Смешение топлива и окислителя.
- Воспламенение и стабилизация горения.
- Увеличение диапазона рабочих параметров – регулирование воздухозаборника и камеры сгорания.

Плазменное стимулирование горения

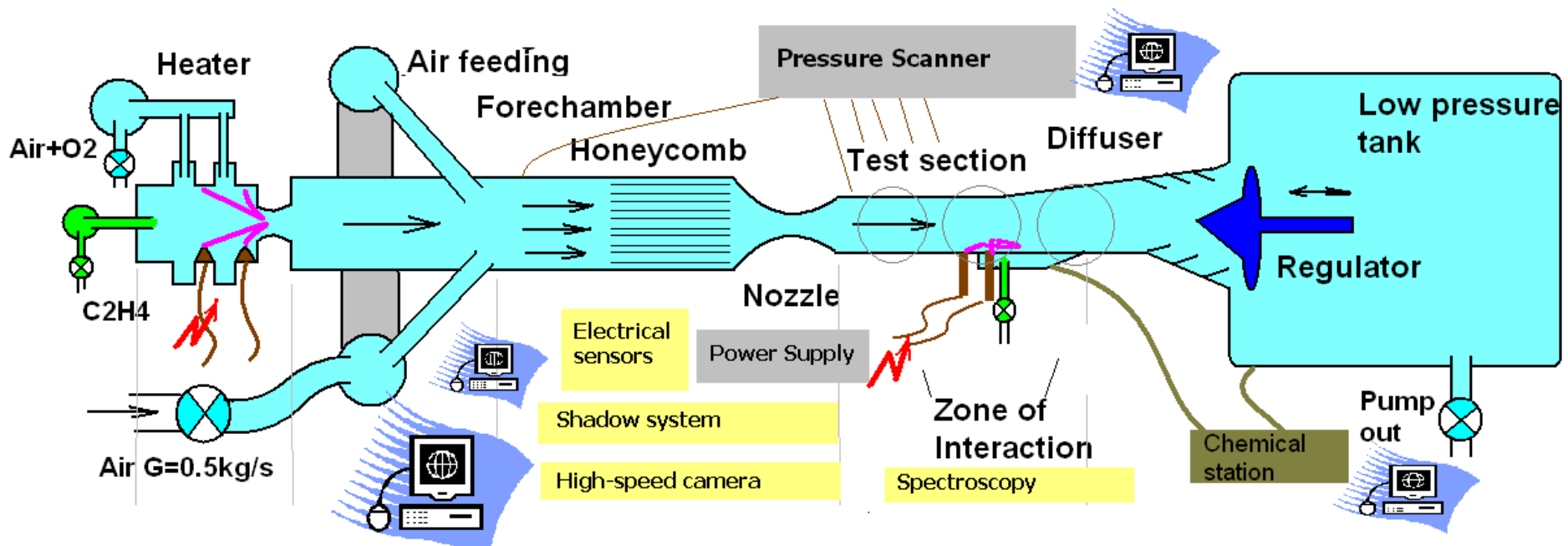
Область параметров: $P=0.2-2$ атм; $T=0.2-2$ кК; $V>500$ м/с

Метод генерации плазмы – поверхностный электродный разряд.

Основные механизмы воздействия:

- Быстрый локальный нагрев газа
- Нарботка активных частиц
- Генерация ударных волн
- Турбулизация потока воздуха

Схема импульсной аэродинамической трубы ИАДТ-50 ОИВТ РАН



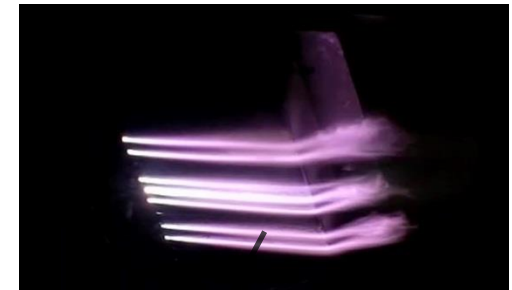
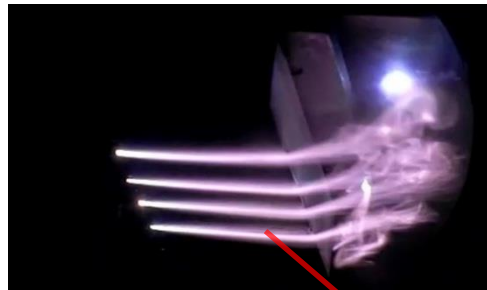
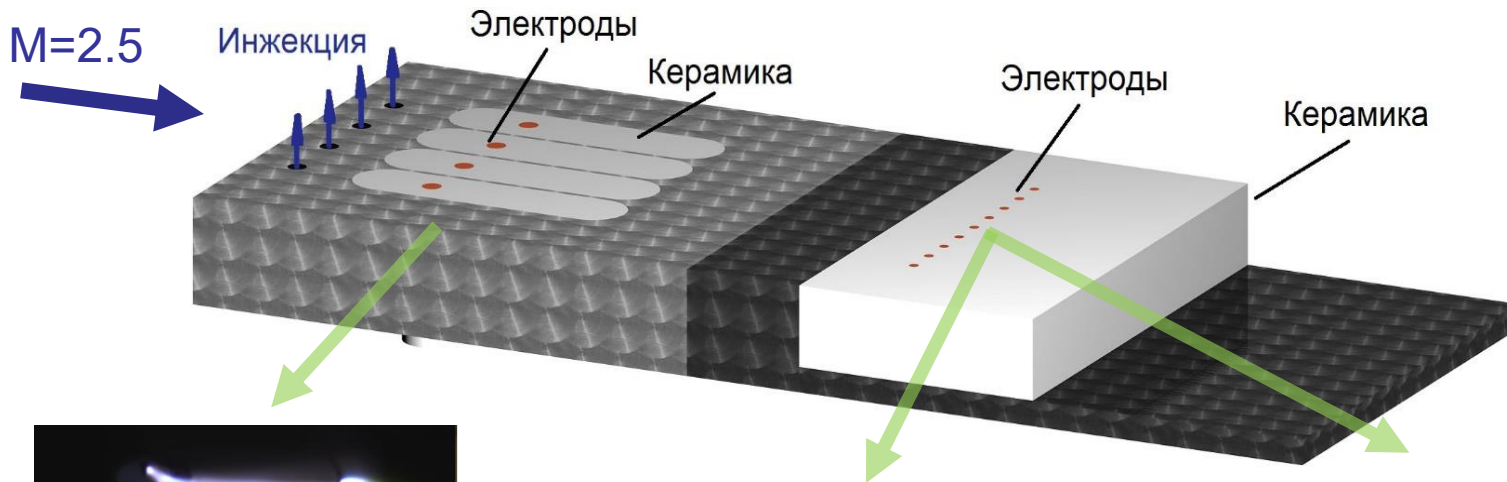
Длительность стационарного аэродинамического режима ~ 0.5 с

Сечение 72×72 мм; $M=2$ or 2.5 ; $P_{st} = 140-180$ Торр; $m_{air} = 0.5-0.9$ кг/с, $m_{fuel} = 0.05-2$ г/с для H_2 ; $m_{fuel} = 1-6$ г/с для C_2H_4

Средства диагностики

- ✓ Распределение давления, 16 точек, 2.5мс
- ✓ Шлирен, 100нс; 0.2мм; 500-2000к/с
- ✓ Видео, до 75 кГц (камера линейного сканирования)
- ✓ Лазерная абсорбционная спектроскопия (H₂O)
- ✓ Оптическая эмиссионная спектроскопия (250-1000 нм)
- ✓ Измерения тока/напряжения
- ✓ ИК камера, WL = 7-12мкм
- ✓ Химическая станция, O₂, NO, CO₂, CO, CxHy

Схемы генерации электрического разряда в сверхзвуковом потоке воздуха



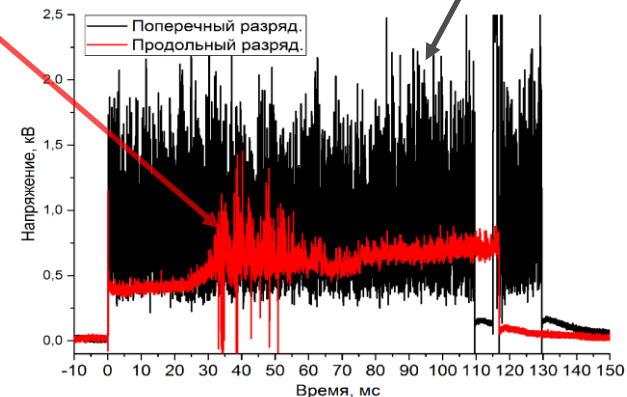
Параметры разряда:

$U_s = 5$ кВ, $U_{dis} = 0.5-1$ кВ

$I_{dis} = 5-18$ А, $W_{dis} = 8-15$ кВт,

$R_a = 0.56$, 1 кОм, $R_k = 0-200$ Ом.

$\Delta t = 600$ мс; 10×100 мс



Генерация разряда, видео



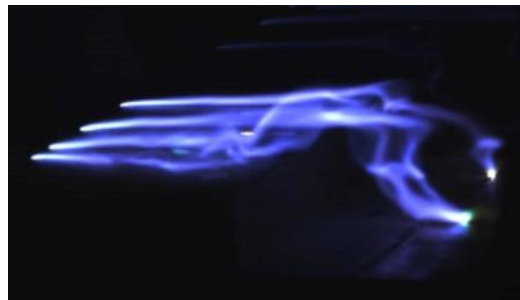
Два режима генерации разряда за уступом
Видеосъёмка 300 кадров/с, $t_{\text{exp}} = 200$ мкс

Горение этилена на установке ИАДТ-50 ОИВТ РАН

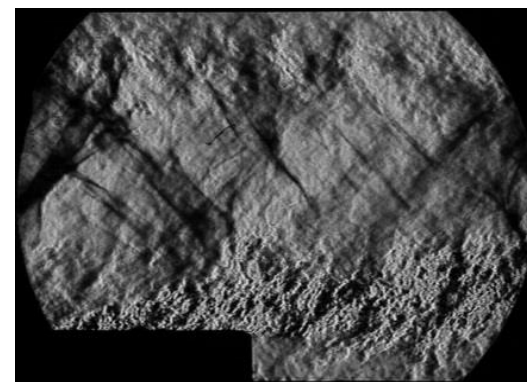
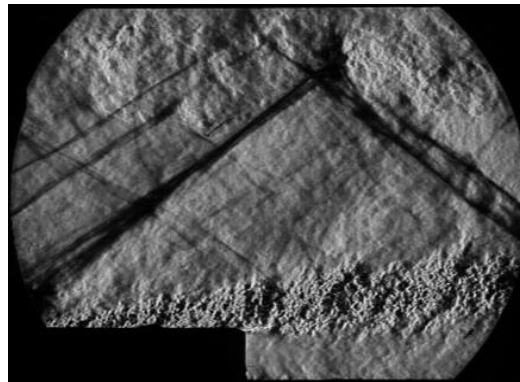
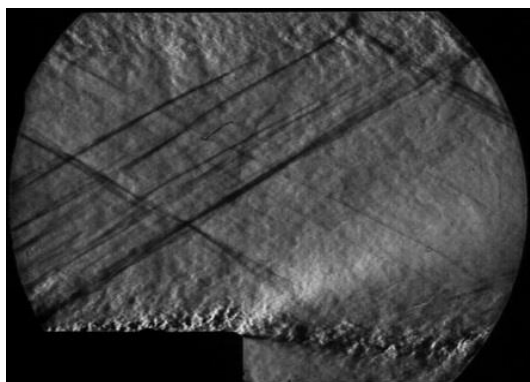
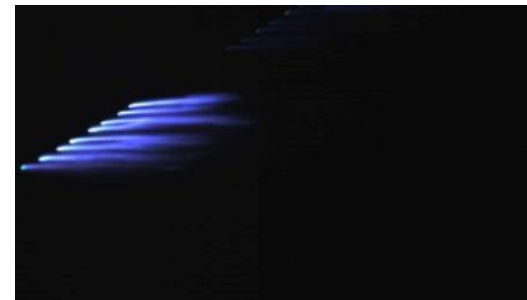
Разряд в потоке.



Инжекция этилена, 2г/с.

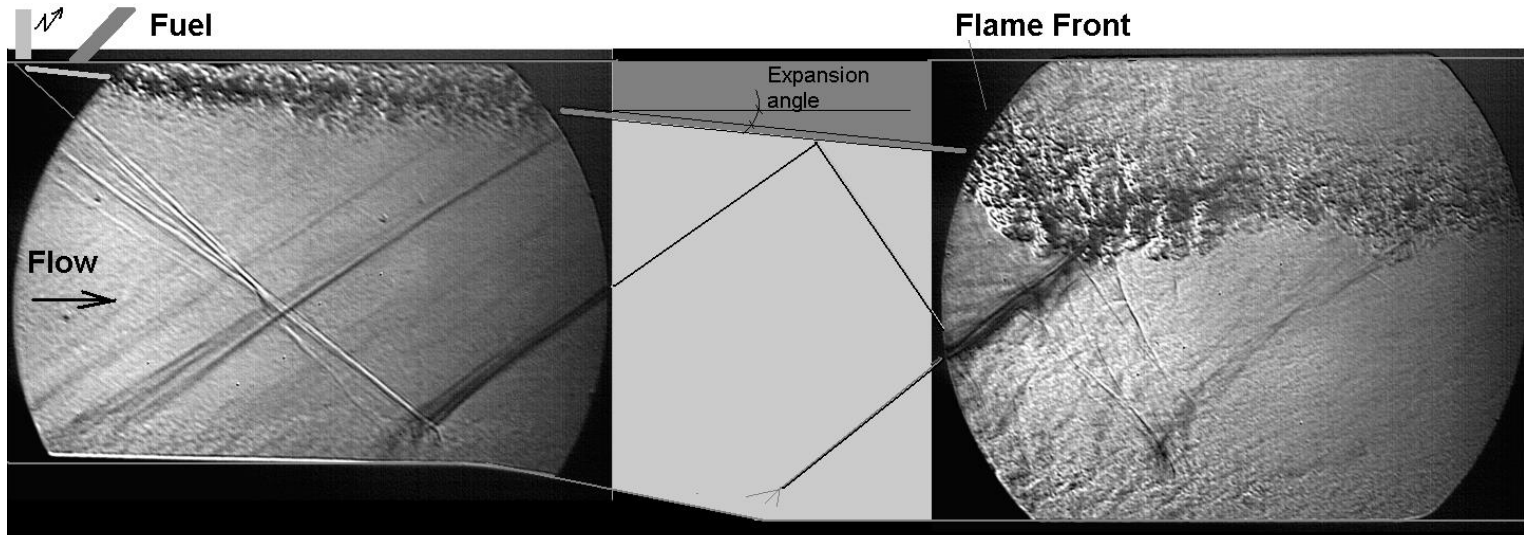


Инжекция этилена, 7г/с.

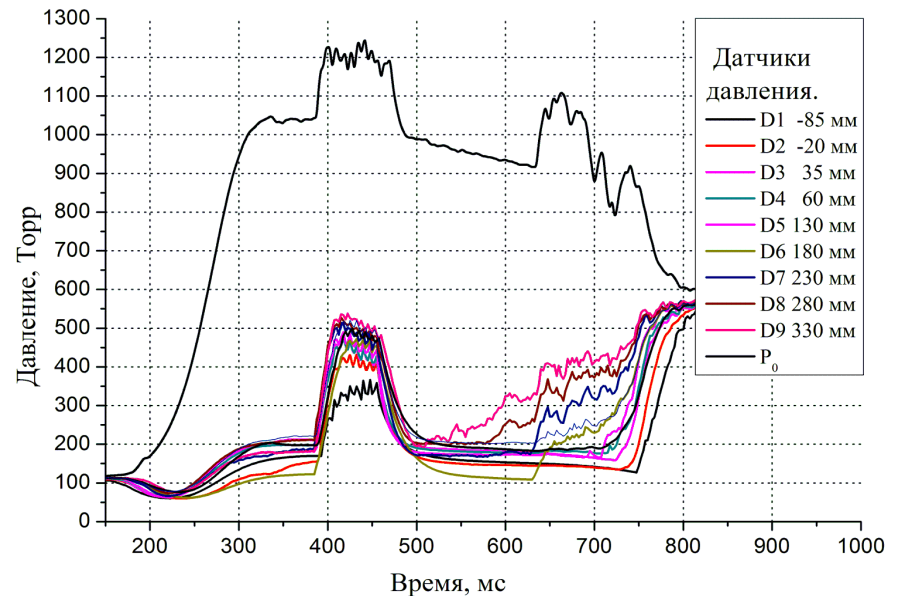
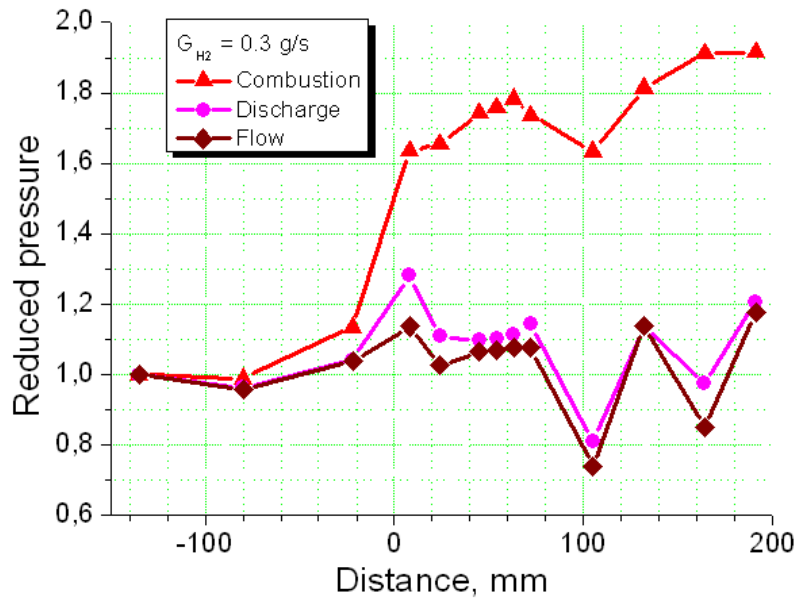


Воздействие режима горения на генерацию разряда: вызванный горением подъём отрывной зоны переводит разряд из продольного в поперечный режим. Стабильность разряда сохраняется.

Основной эффект: стабилизация плазмы



Распределение давления и его динамика



Динамика структуры потока

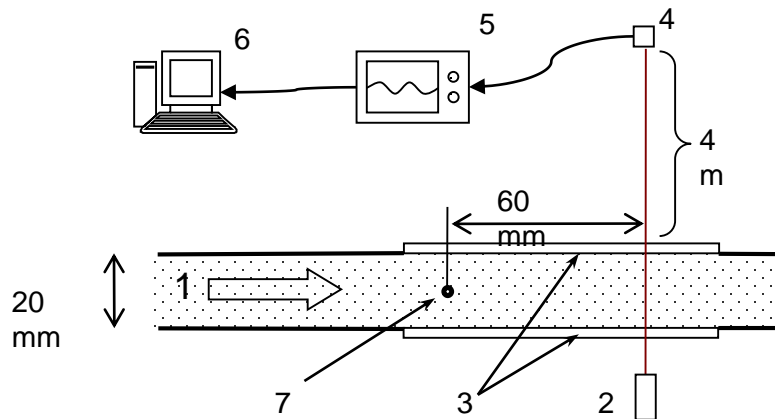
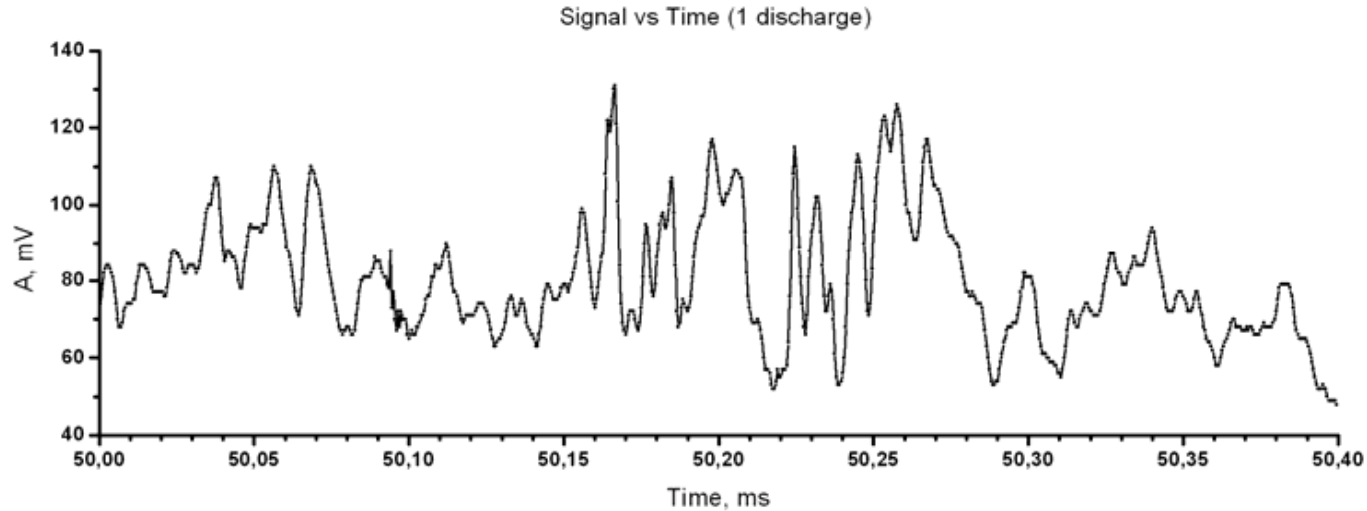
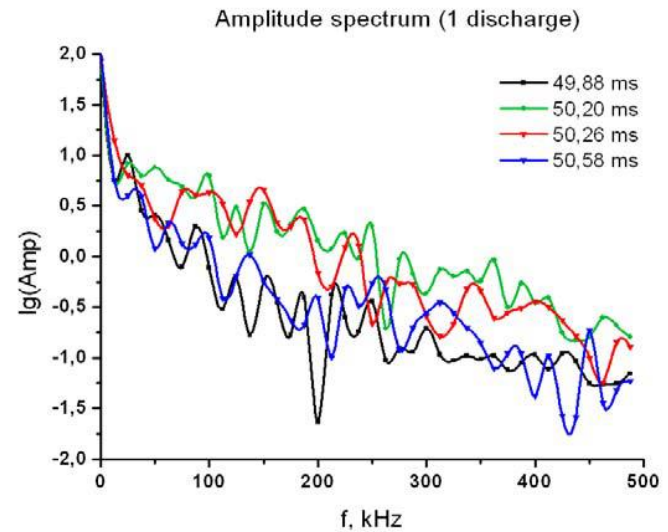


Схема эксперимента. 1 – сверхзвуковой поток, $M = 2$; 2 – лазерный диод; 3 – оптические окна; 4 – фотодиод; 5 – двухканальный осциллограф; 6 – компьютер; 7 – соосные электроды.



В потоке воздуха генерируются газодинамические возмущения в широком частотном диапазоне

Горение водорода в холодном воздухе

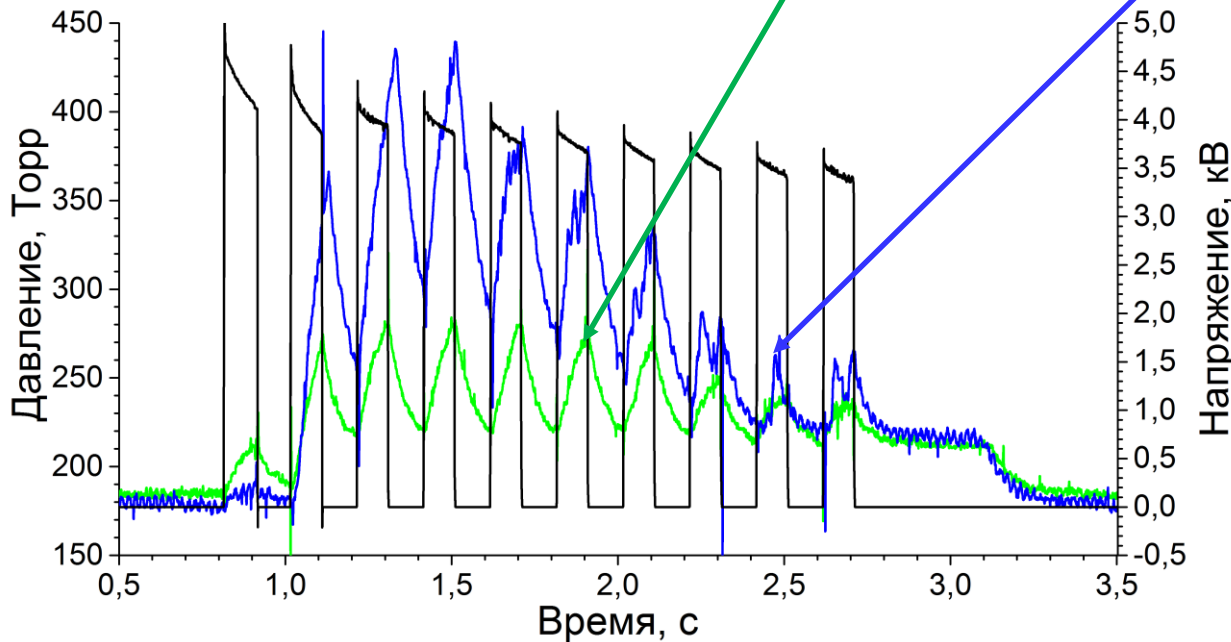
Воздействие горения водорода на разряд.



Разряд в потоке

Инжекция водорода 2.4 г/с

Инжекция водорода 5 г/с



Динамика давления:

Давление при 2.4 г/с

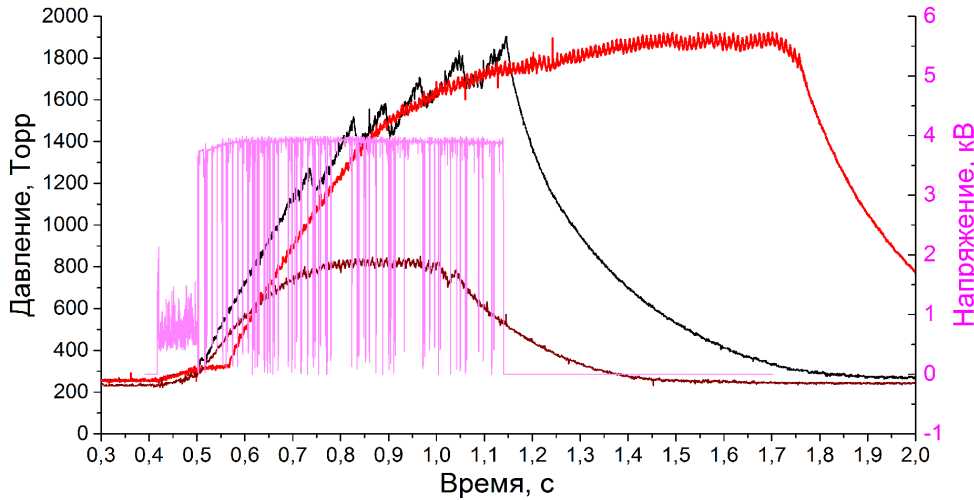
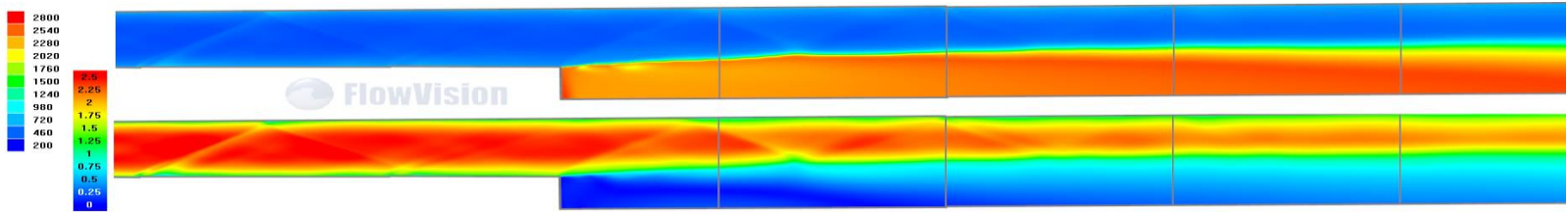
Давление при 5 г/с

Напряжение на источнике питания

Режим генерации – импульсно-периодический

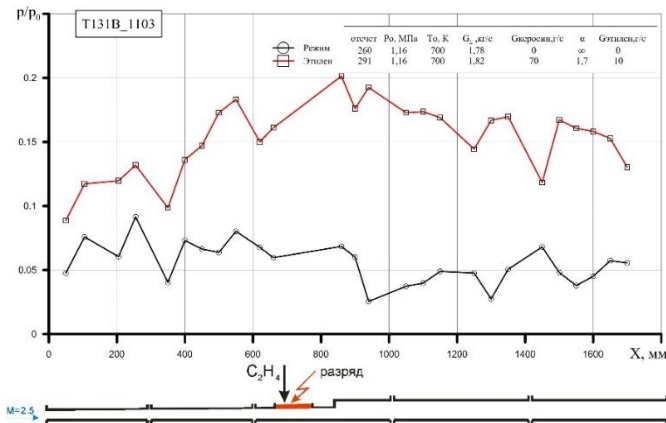
Разряд стабилизирует горение

Горение керосина, пилотное топливо – этилен

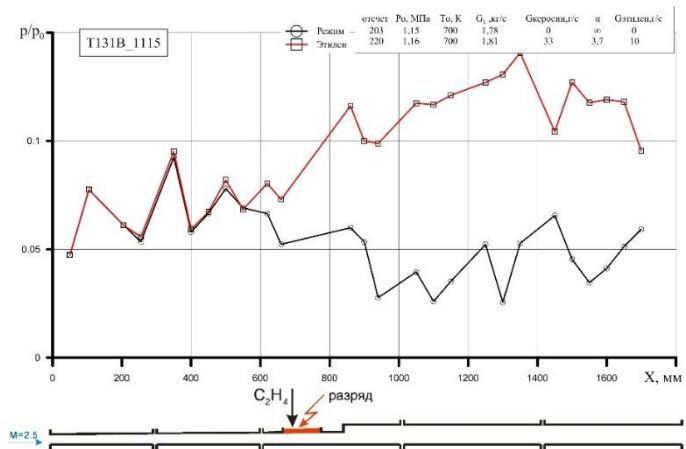


Динамика давления и напряжения.

Напряжение - $\Delta t = 600$ мс.
 Давление – $T_0=700$ К, $\alpha=1.8$
 Давление – $T_0=900$ К, $\alpha=1.8$
 Давление – $T_0=700$ К, $\alpha=3.7$



$\alpha=1.8$, $T_0=700$ К



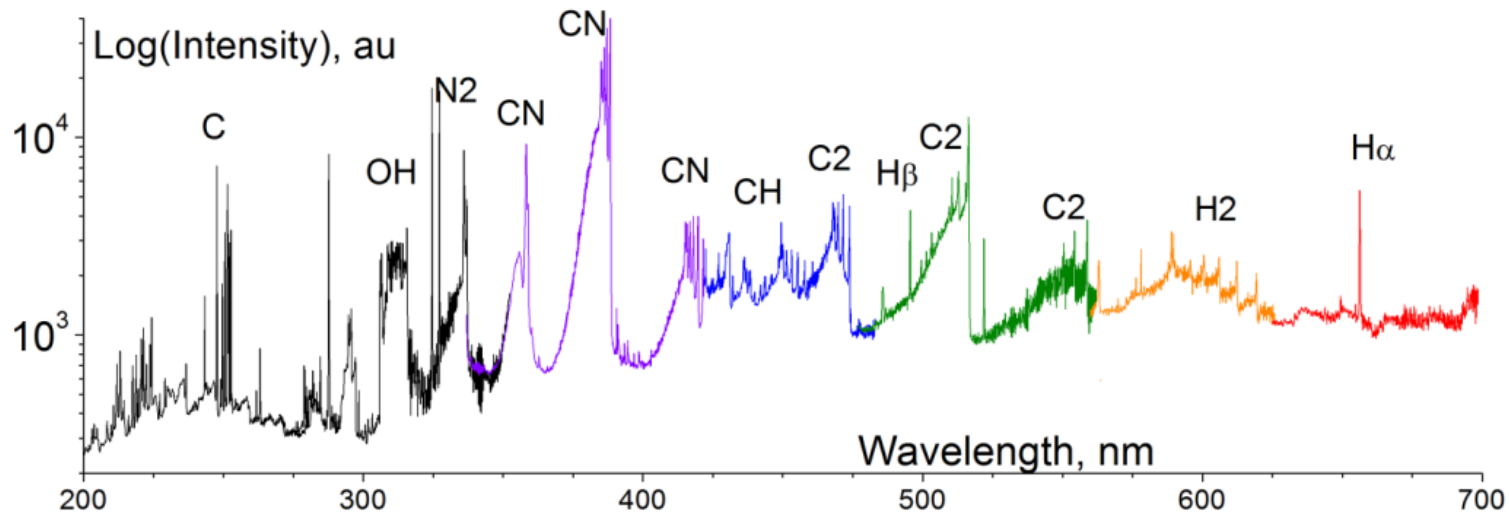
$\alpha=3.7$, $T_0=700$ К

Стабилизация пламени – основные положения

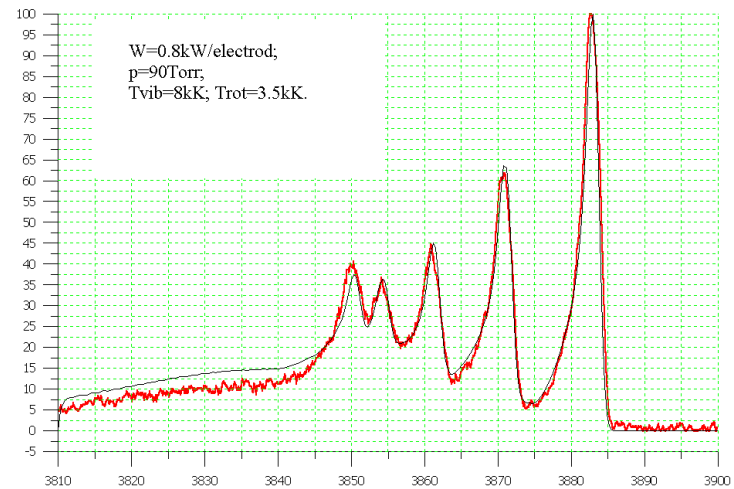
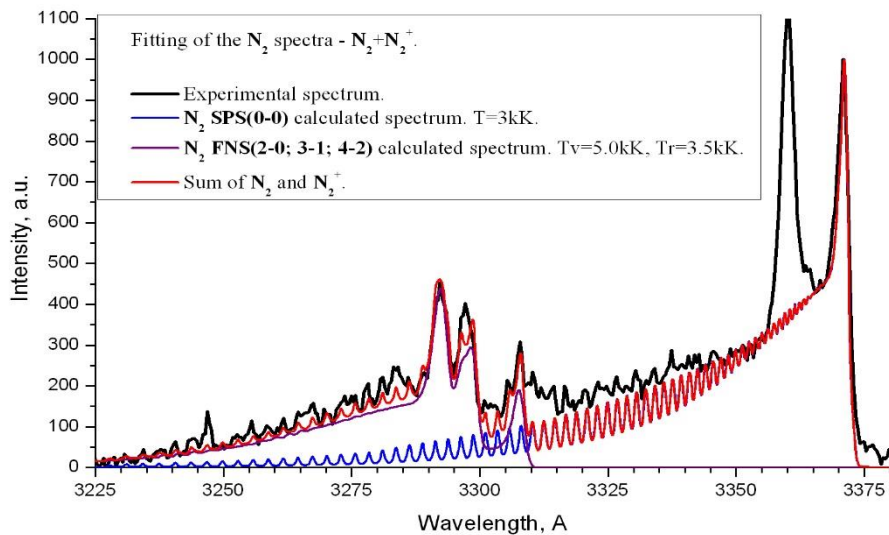
- Энергетический порог воспламенения/стабилизации горения порядка 1-5% энтальпии потока
- Основные параметры разряда, влияющие на горение:
 - Мощность разряда
 - Геометрическая компоновка – время взаимодействия
- Полнота сгорания выше 90% для бедной смеси при оптимальных условиях
- Реализовано воспламенение и стабилизация горения H_2 , C_2H_4 и керосина в сверхзвуковом потоке $M=2-2.5$ в диапазоне температур торможения 700 - 900 К.

Пассивная оптическая спектроскопия

Обзорный спектр разряда во время инъекции этилена (C_2H_4) в потоке воздуха

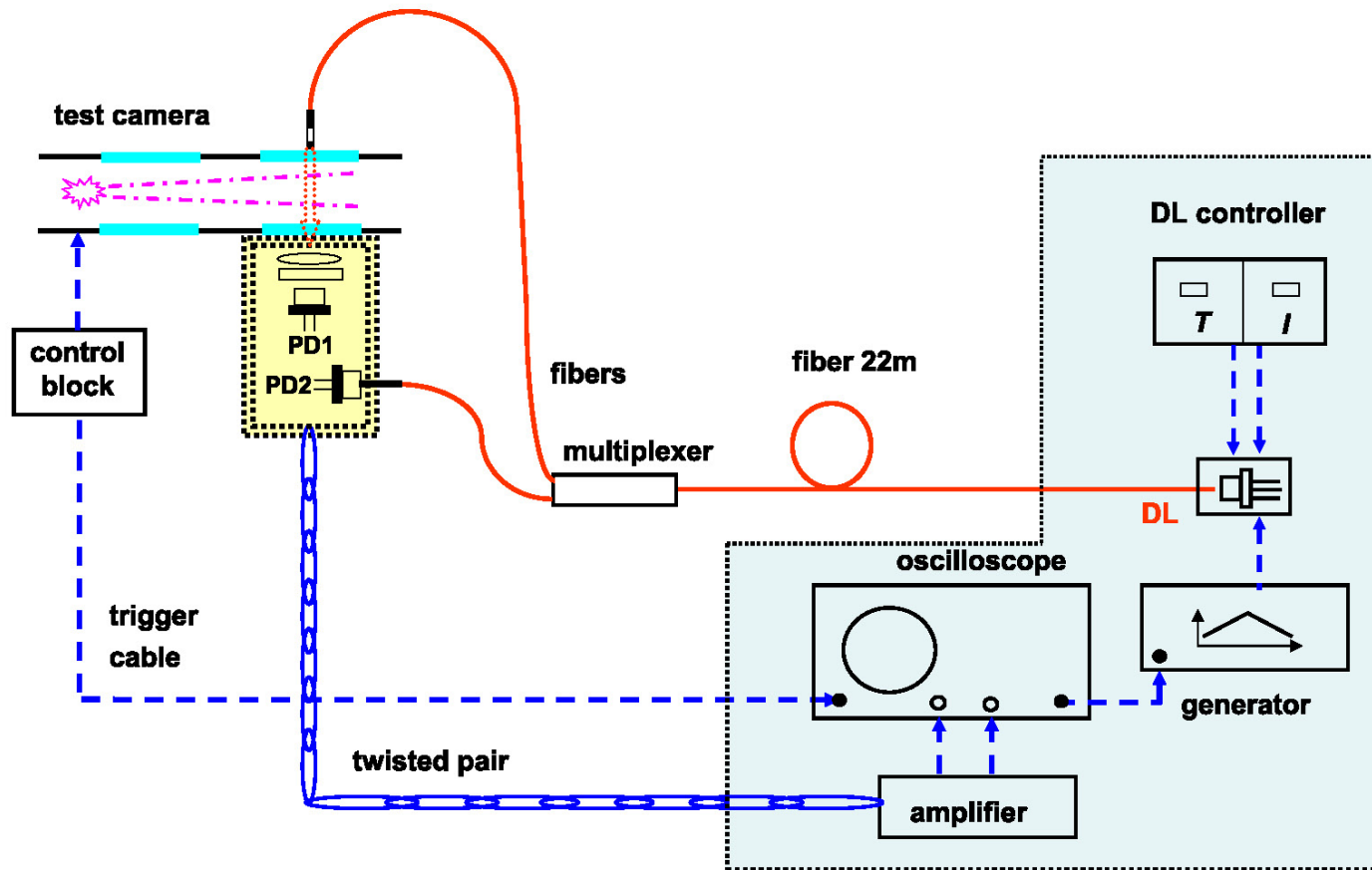


Измерение температуры газа по 2-ой положительной системе азота и фиолетовой циана



Измеряются параметры горячей области!

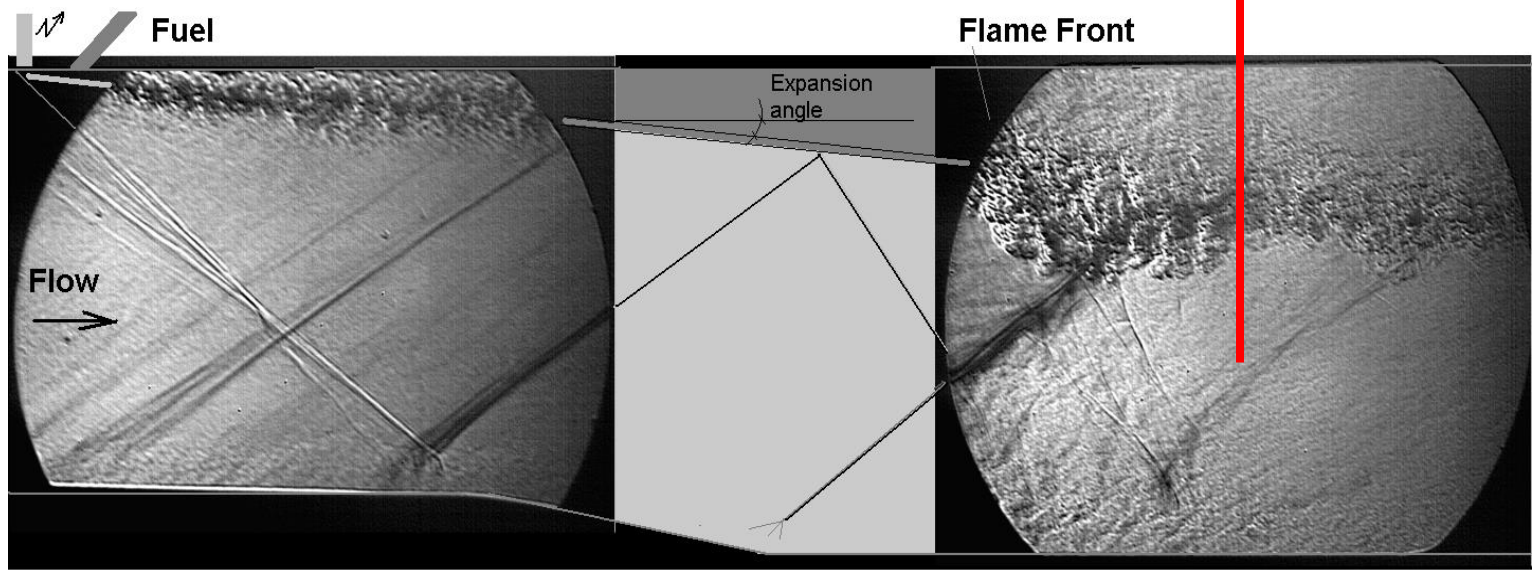
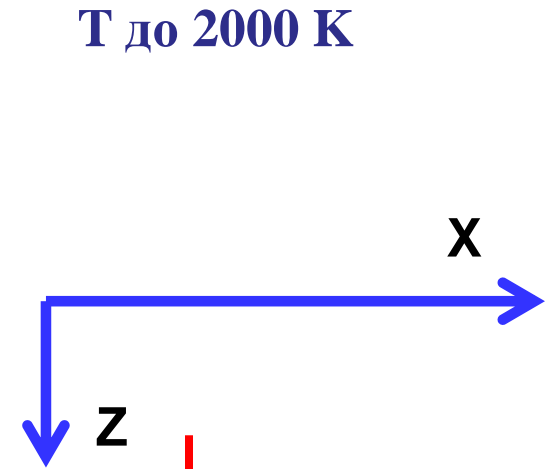
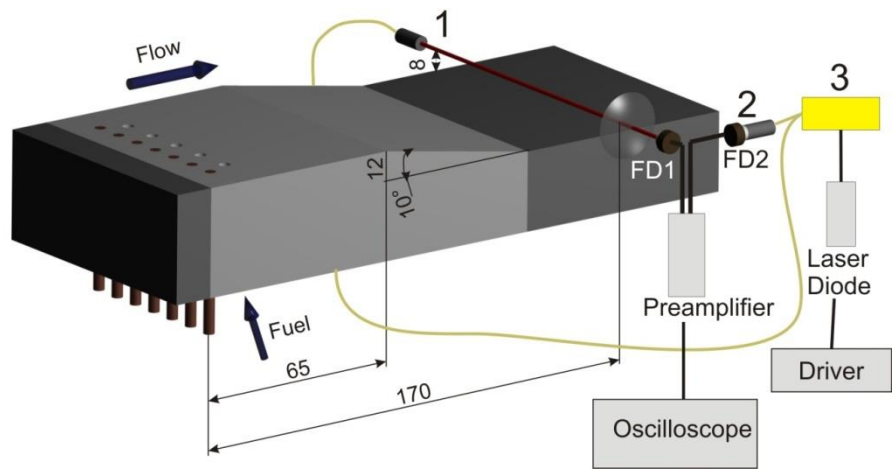
Диодная лазерная абсорбционная спектроскопия



Distributed feedback (DFB) diode laser (NLK1E5GAA, NEL, Japan) with output in the 1.39 μm range.

7189.344 cm^{-1} ($E'' = 142 \text{ cm}^{-1}$)
 7189.541 cm^{-1} ($E'' = 1255 \text{ cm}^{-1}$)
 7189.715 cm^{-1} ($E'' = 2005 \text{ cm}^{-1}$)

Измерения температуры H_2O в экспериментах по горению в сверхзвуковом потоке



Динамика спектра поглощения

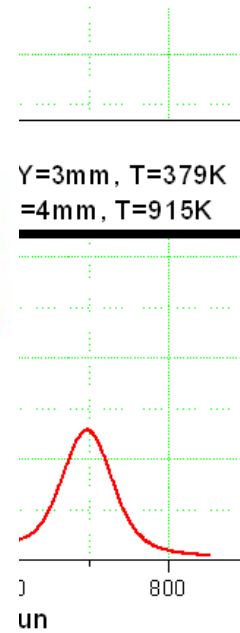
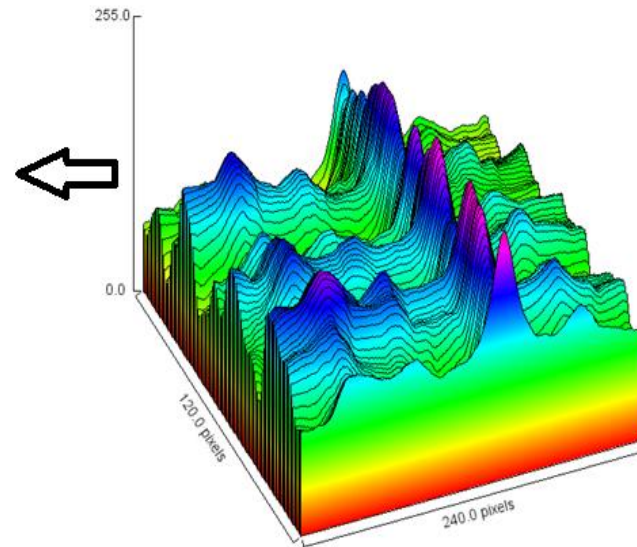
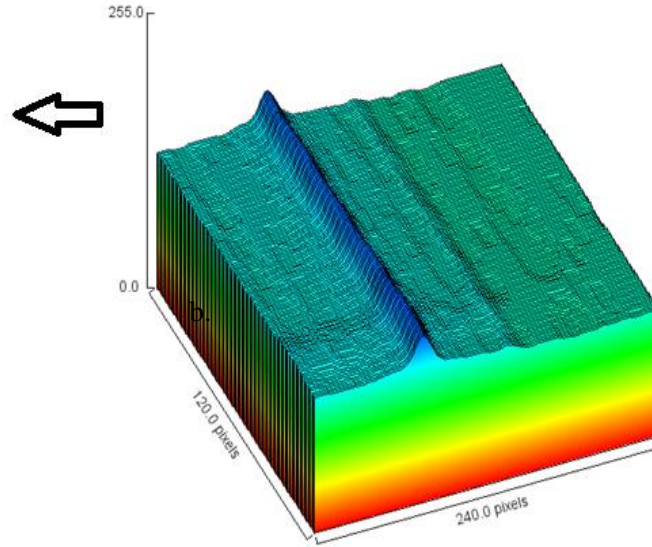
"Cold" Flow



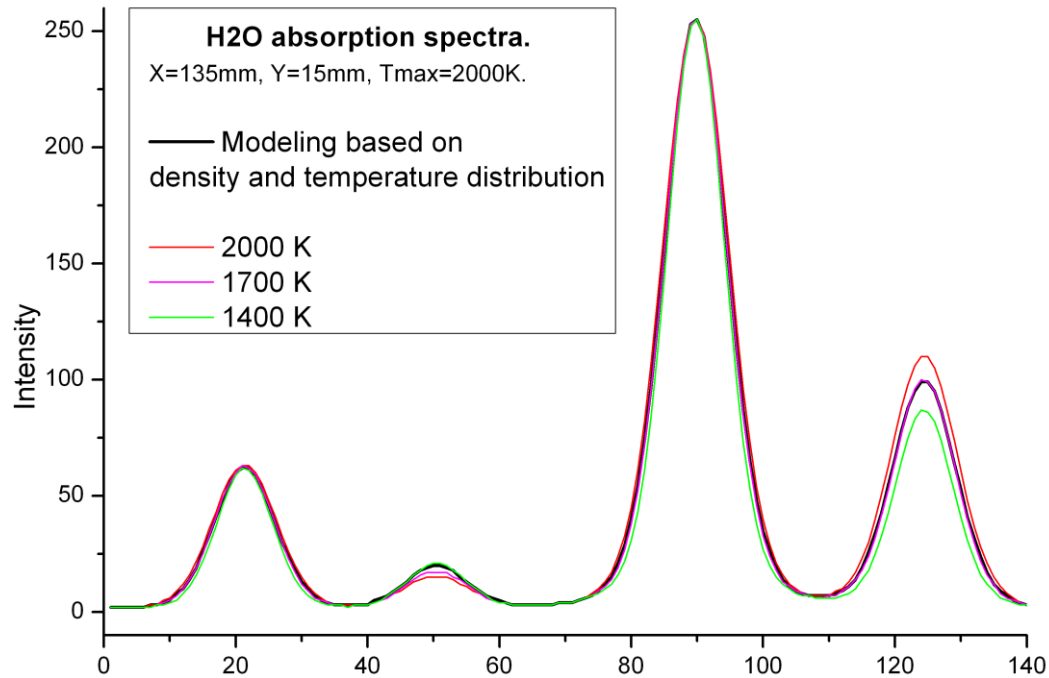
H₂O frozen out

Combustion

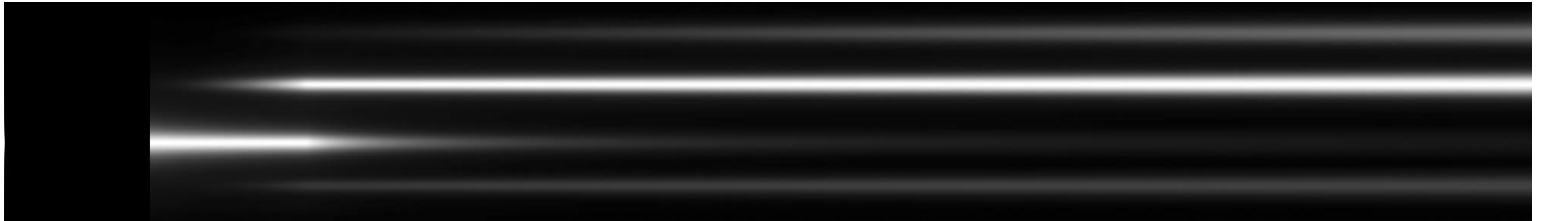
Time after



TDLAS – Проблема интегрирования по лучу и чувствительности в широком диапазоне температур



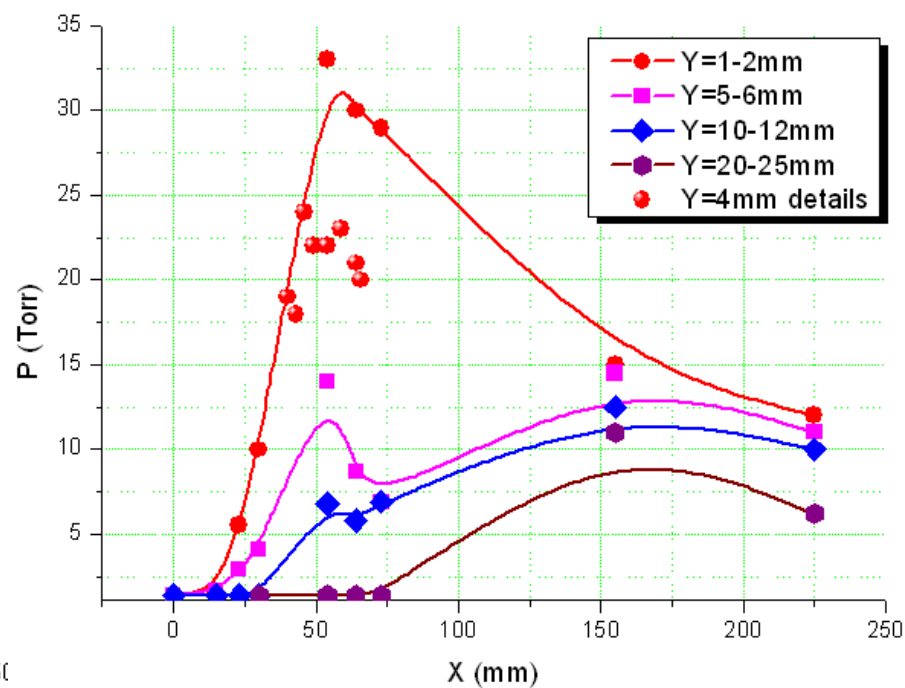
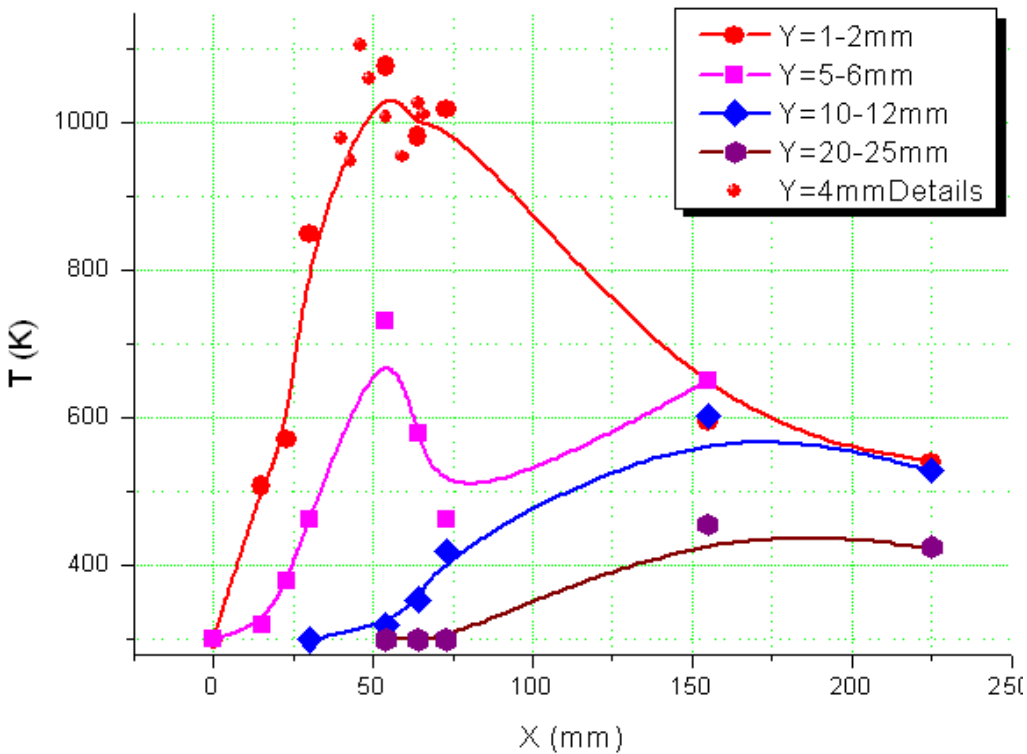
Экспериментальный спектр может не описываться модельным



Низкая чувствительность после выше 700 К

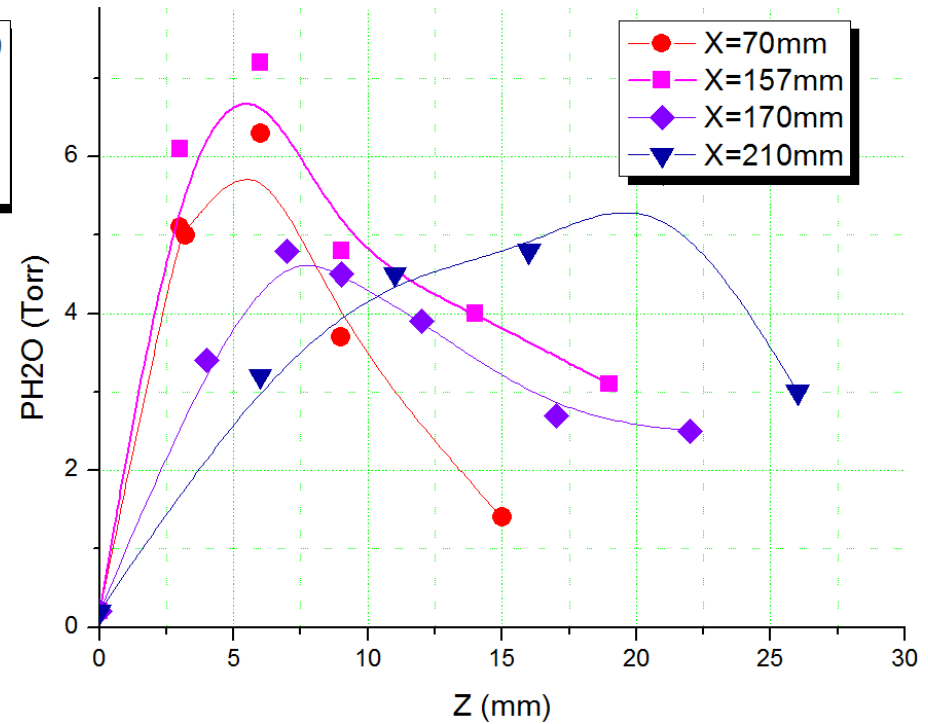
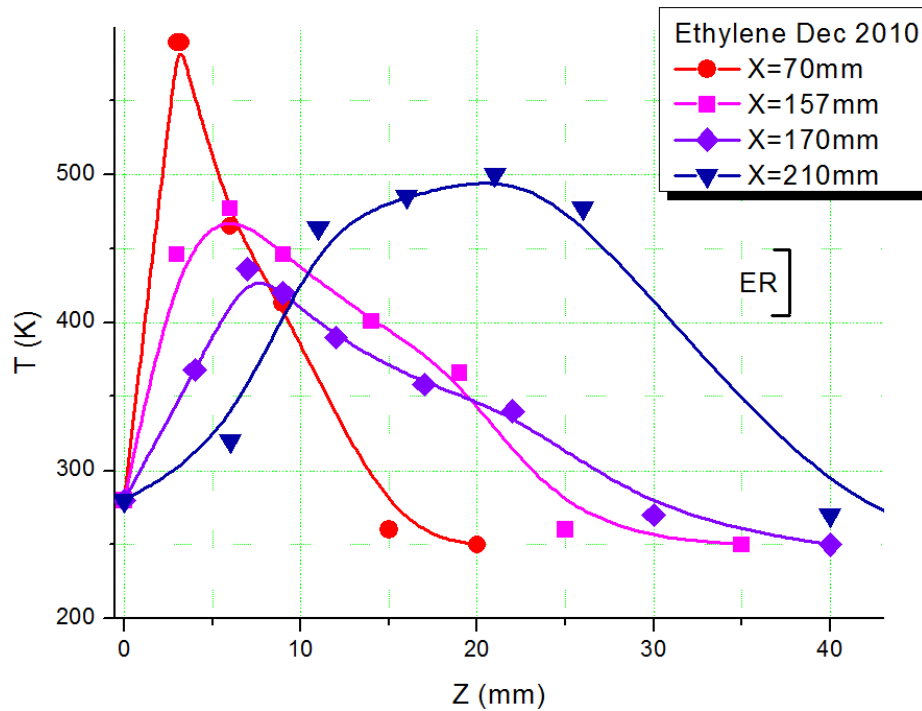
Горение водорода

Пространственные распределения T_{H_2O} и P_{H_2O}



Горение этилена

Пространственные распределения TH_2O и PH_2O



Экспериментально продемонстрирован двухстадийный механизм горения углеводородов.

Требования к методам диагностики

- ✓ Отсутствие возмущений в потоке – **оптические методы**
- ✓ Нестационарность процессов – **высокое временное разрешение, меньше 10 мкс**
- ✓ Неоднородность структуры потока – **высокое пространственное разрешение, порядка 1 мм**
- ✓ Неоднородность зоны взаимодействия – **широкий диапазон измерений температуры, 300 - 2000 К**
- ✓ Генерация электрического разряда – **помехозащищённость, учёт излучения плазмы**
- ✓ Турбулентность потока и большие градиенты плотности – **учёт динамики преломления в лазерных методах**
- ✓ Высокая стоимость пуска при высоких параметрах потока – **многоканальность измерений**