

Объединенный институт высоких температур РАН

Основные научные результаты подразделений ОИВТ РАН (часть 4)

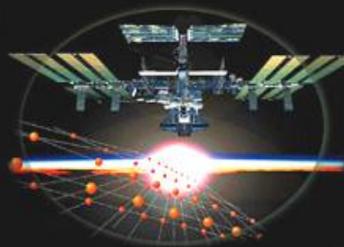
Докладчик: Васильев М.М.



20 лет Международному космическому эксперименту "ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ"



На занятиях с первым экипажем МКС:
Анатолий Нефедов, Александр Иванов, Уильям Шепард, Юрий Гидзенко, Владимир Молотков, Сергей Крикалев, Владимир Фортов.
11 сентября 2000 года – ОИВТ РАН.



Космонавты Сергей Крикалев и Юрий Гидзенко проводят первый сеанс эксперимента на аппаратуре «Плазменный кристалл – 3 Нефедов». 3 марта 2001 года - МКС.

Международная кооперация по КЭ
«Плазменный кристалл»



Космонавт Елена Серова монтирует аппаратуру для эксперимента «Плазменный кристалл — 4». 27 ноября 2014 года



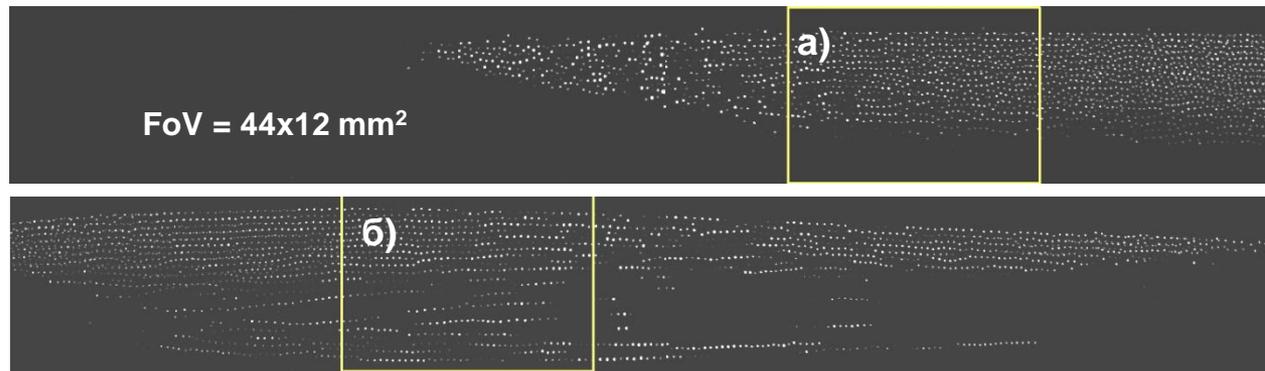
Космонавт Анатолий Иванишин проводит эксперимент «Плазменный кристалл — 4». 17 июня 2020 года



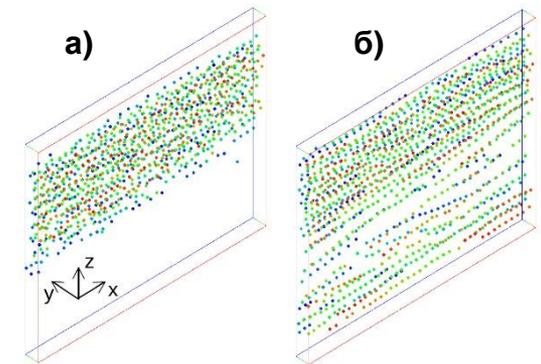
Влияние отрицательных ионов на форму и структуру плазменно-пылевого облака в однородном положительном столбе – эксперимент “Плазменный кристалл-4” на МКС

1. Эксперимент: ток разряда 1 мА, режим переключения полярности разряда 100 Гц, давление газа 60 Па, диаметр микрочастиц 3.38 мкм

- а) в чистом неоне облако однородно, а его структура изотропна
- б) в неоне с примесью 1% воздуха облако вытесняется из центра разрядной камеры, а структура становится цепочечной



Восстановление 3D структуры посредством сканирования лазерным ножом на глубину 0.5 мм



2. Теория:

Описание радиального распределения микрочастиц основано на приближении Шоттки и предполагает пространственно независимые кинетические коэффициенты, нулевые граничные условия для плотностей положительных и отрицательных ионов, больцмановской ФРЭЭ и нулевой поток отрицательных ионов на стенку камеры [1].

В линейном гидродинамическом приближении рассчитано распределение электрического потенциала вокруг заряженной поглощающей пылевой микрочастицы в дрейфующей слабоионизованной столкновительной плазме с отрицательными ионами. Показано, что кулоновская асимптота электрического потенциала вокруг микрочастицы деформируется под действием потока отрицательных ионов и имеет впадину по потоку за микрочастицей. Впервые показано, что присутствие протекающих отрицательных ионов способствует образованию струн в плазменно-пылевых структурах при относительно больших давлениях (выше 60 Па) [2].

Публикации по теме:

- 1. A.V. Zobnin, A.D. Usachev, A.M. Lipaev, O.F. Petrov, V.E. Fortov, M.Yu. Pustynnik, H.M. Thomas, and M.H. Thoma. Effect of negative ions on the structure of strongly-couplet complex plasmas. Submitted to Journal of Plasma Physics.
- 2. A.V. Zobnin, Anisotropic potential around charged absorbing small particle in a collisional electronegative plasma with ion drift. Journal of Plasma Physics 86, N3, p. 905860302 (2020) [Q2]



Лаб. 17.1 – плазменно-пылевых процессов
Зав. лаб. к.ф.-м.н. Усачев Александр Дмитриевич



Книга “Статистическая физика плотных газов и неидеальной плазмы”

В книге рассмотрены последние достижения фундаментальной физики состояний вещества, начиная с плотных газов и неидеальной плазмы и заканчивая веществом с экстремально высокой плотностью энергии (ООО ФизМатЛит 2020).

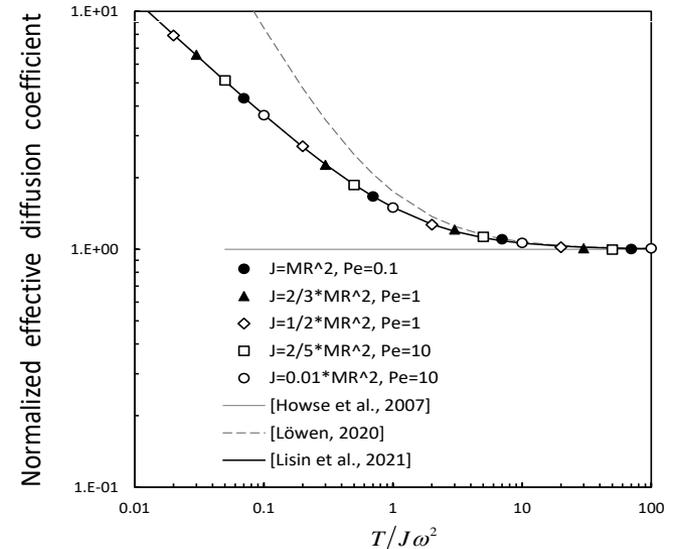
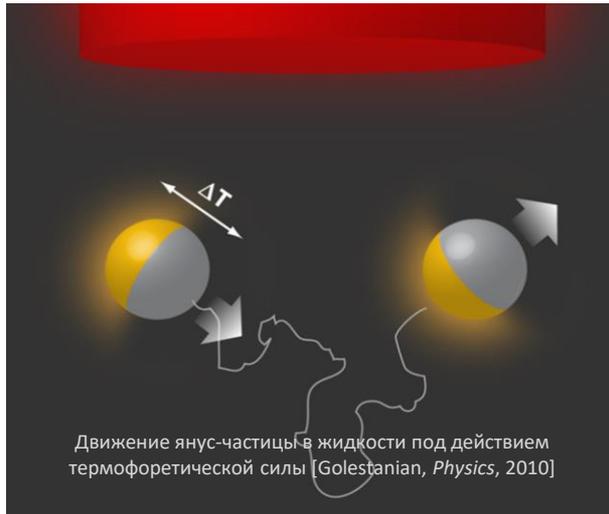


Лаб. 17.1 – плазменно-пылевых процессов
Зав. лаб. к.ф.-м.н. Усачев Александр Дмитриевич
Рук. работы г.н.с., д.ф.-м.н. Филинов Владимир Сергеевич



Расчетно-теоретическое описание движения активных броуновских частиц в широком диапазоне вязкости среды

Особенностью синтетических активных броуновских частиц является их способность самостоятельно преобразовывать энергию из окружающей среды в собственное направленное механическое движение. Впервые получены аналитические выражения для эффективного коэффициента диффузии и длины персистенции активной броуновской (янус-) частицы в средах различной вязкости. Получено хорошее согласие разработанной теории с результатами численного моделирования движения активной броуновской частицы в широком диапазоне вязкости среды.

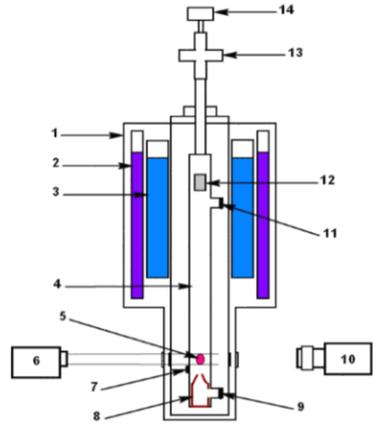


Lisin E.A., Vaulina O.S., Lisina I.I., Petrov O.F., *Phys. Rev. E.* (submitted)
Brownian motion of a self-propelled spherical particle in media of different viscosity

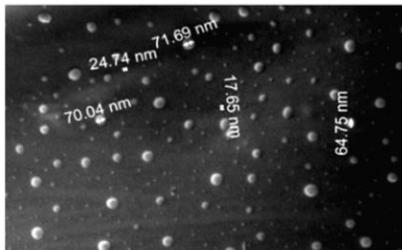


Пыле-акустическая неустойчивость в многокомпонентной криогенной пылевой плазме при температуре $T_{He} = 2$ К

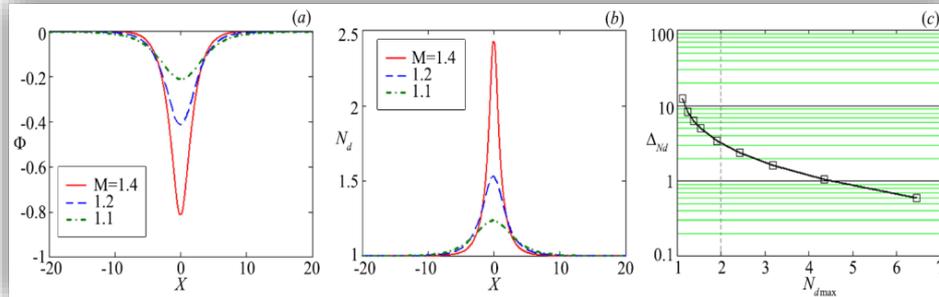
Исследована пылевая плазма тлеющего разряда низкого давления при температуре газа ~ 2 К. Обнаружена и исследована нелинейная пыле-акустическая неустойчивость, возбуждаемая в конденсированной субмикронной фракции пыли, возникающей вследствие ионного распыления полимерной диэлектрической вставки. Для анализа возбуждаемых нелинейных волн использованы гидродинамические модели, позволившие сделать необходимые оценки параметров разряда. В частности, были рассчитаны радиус Дебая – λ_d , ионная температура – T_i , скорость дрейфа частиц и др. Независимо от других авторов установлено, что ионы в разряде являются перегретыми при наличии значительного электрического поля. Рассмотрены причины развития неустойчивости. Наиболее вероятной причиной являются силы трения о буферный газ, возникающие при наличии значительного дрейфа.



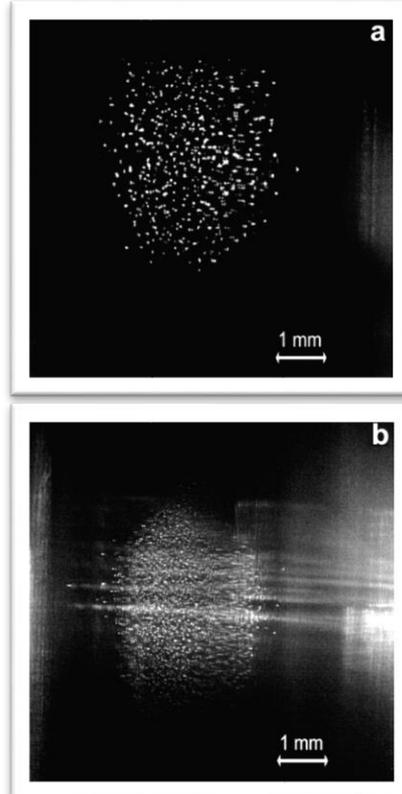
1-криостат; 2 – жидкий азот; 3 – жидкий гелий; 4 – разрядная трубка; 5 – пылевое облако; 6 – лазер; 7 – термометр; 8 – диэлектрическая вставка; 9 – катод; 10 – видеокамера; 11 – анод; 12 – инжектор частиц; 13 – контроллер давления; 14 – датчик давления



Наноразмерные частицы формируемые в разряде за счет конденсации распыленного материала диэлектрической вставки.



Профиль нелинейной пыле-акустической волны. (a) – Потенциал. (b) – концентрация пылевых частиц. (c) – зависимость ширины профиля пылевой концентрации от амплитуды волны.

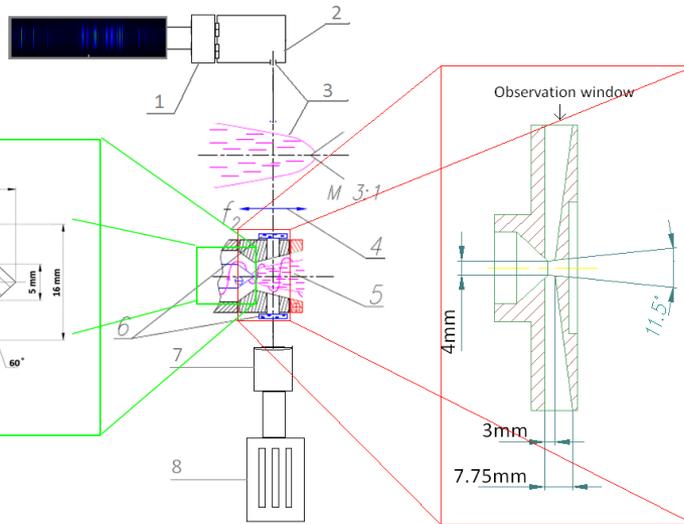


Плазменно-пылевая структура. (a) – начальный момент времени, структура содержит только микронные частицы SeO_2 . (b) – спустя 20 минут после образования структуры. Структура содержит конденсированную фазу нанокластеров, движущуюся вверх со сверхзвуковой скоростью.

Лаб. 17.3 - активных кулоновских систем
Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Васильев М.М.



ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИВЯЗКИ ДУГИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТОРИРОВАННОГО КАТОДА В АРГОНОВОЙ СРЕДЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ



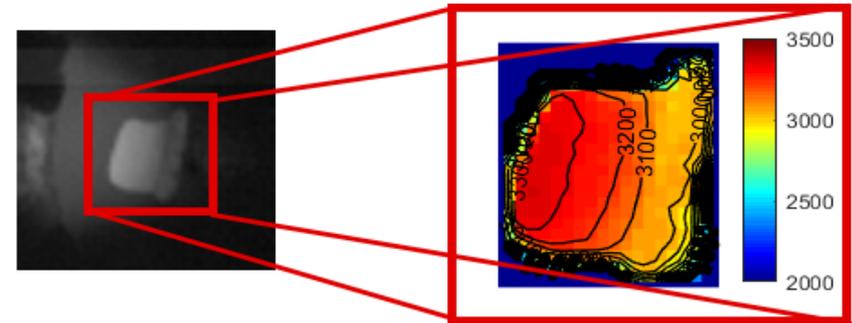
Экспериментальная установка:

1 - спектрограф ДФС-452; 2 - видеоматрица Andor 420 Duo; 3 - проекция изображения дуги на щель спектрографа; 4 - фокусирующая линза; 5 - катодная и электрическая дуга; 6-смотровые кварцевые окна; 7 - объектив «Гелиос-40-2»; 8 - черно-белая камера Phantom Miro M110

Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Valyano G.E., Scherbakov V.V., Konovalov P.A., Gadzhiev M.Kh.

Phys. Plasmas. 27, 023506 (2020)

Features of the arc binding region structure on the surface of the thoriated cathode in atmospheric pressured argon



Термограммы поверхности катода

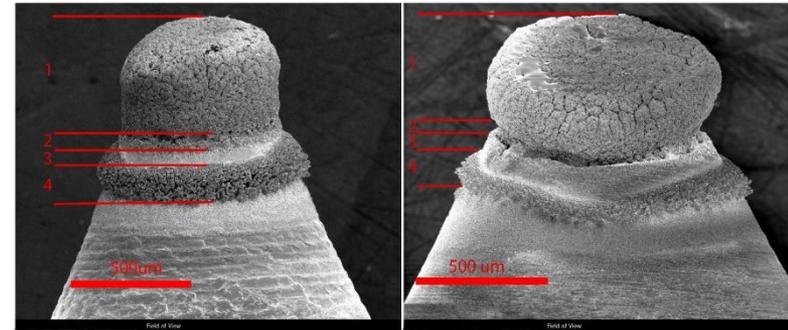


Фото кончика катода из торированного вольфрама после 30 минут работы: при токе 200 А (слева) и 300 А (справа), на рисунке показаны зоны с различным содержанием тория и вольфрама. Зона 1 - почти чистый вольфрам (<0,5% Th); зона 2 стандартное содержание тория (2% Th) и 98% вольфрама; зона 3 повышенное содержание тория до 40% и более; зона 4 осаждения вольфрама. Дуга горит на первых 3-х зонах.

Экспериментально исследованы параметры дугового разряда постоянного тока атмосферного давления в аргоне, изучен химический состав поверхности катода из торированного вольфрама (W-2% ThO₂) в зоне привязки дуги для токов дуги 200 и 300 А. При работе плазматрона регистрировались температура и концентрация электронов в положительном столбе, а также температура поверхности катода. Выполнен расчетно-теоретический анализ распределения плотности тока и напряженности электрического поля в зоне привязки дуги. В результате было выявлено три принципиально разные зоны привязки дуги, также были определены их площади, размеры и химические составы. Было установлено, что каждая из зон имеет свою напряженность поля и соответственно свою отличную от других зон плотность тока.

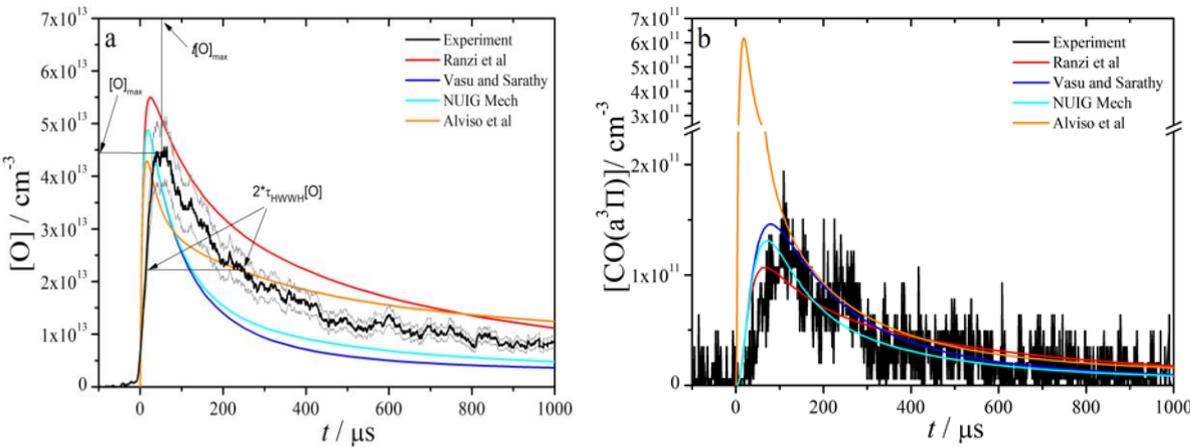
Лаб. 18 – плазменных технологий
Зав. лаб. к.ф.-м.н. с.н.с., Гаджиев Махач Хайрудинович
Рук. работы Саргсян Микаэл Арменович



Неравновесное излучение окиси углерода при окислении биотоплив

Экспериментальные и расчетные профили $[O]$ и $[CO(a^3\Pi_r)]$ окислении диметилэфира CH_3OCH_3

Кинетический механизм образования и расходования электронно-возбужденного CO



Экспериментально изучена кинетика образования монооксида углерода при высокотемпературном окислении диметилэфира CH_3OCH_3 , бутанола C_4H_9OH и метана в широком диапазоне температур. Во всех исследованных смесях впервые зафиксировано неравновесное излучение триплета $CO(a^3\Pi_r)$. Разработан и внедрен в современные кинетические модели механизм его формирования и расходования, позволяющий удовлетворительно описать все полученные данные. Предложена новая эмиссионная диагностика CO , пригодная для изучения процессов горения большого класса углеводородных соединений.

Процесс	$k, \text{cm}^3 \text{mole}^{-1} \text{s}^{-1}$	Метод
Химические реакции		
$CO(a^3\Pi_r) + M = C + O + M$	$2.7 \times 10^{23} T^{-2.2} \exp(-61550 \text{ K}/T)$	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + O = C + O_2$	4.0×10^{13}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + CO = C + CO_2$	$4.1 \times 10^{14} \exp(-23822 \text{ K}/T)$	Расчет
$CO(a^3\Pi_r) + O_2 = CO_2 + O$	1.0×10^{14}	Лит.
$C + NO = CO(a^3\Pi_r) + N$	$2.8 \times 10^{13} \exp(-16593 \text{ K}/T)$	ММVT
$C + OH = CO(a^3\Pi_r) + H$	$4.80 \times 10^{14} T^{-0.34}$	Расчет
$CH + O = CO(a^3\Pi_r) + H$	$6.14 \times 10^{13} \exp(-3668 \text{ K}/T)$	ММVT
$CH_2 + O = CO(a^3\Pi_r) + H_2$	$1.23 \times 10^{14} \exp(-1141 \text{ K}/T)$	ММVT
$CH_2(a^1A) + O = CO(a^3\Pi_r) + H_2$	$1.23 \times 10^{14} \exp(-945 \text{ K}/T)$	ММVT
$C_2H + O = CO(a^3\Pi_r) + CH$	$1.45 \times 10^{13} \exp(-41355 \text{ K}/T)$	ММVT
collisional quenching		
$CO(a^3\Pi_r) + Ar = CO + Ar$	$3.5 \times 10^8 T^{0.5}$	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + O = CO + O$	1.1×10^{14}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + N_2O = CO + N_2O$	1.6×10^{14}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + CH_4 = CO + CH_4$	2.1×10^{14}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + C_2H_2 = CO + C_2H_2$	4.5×10^{14}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + CO = CO + CO$	6.6×10^{13}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + NO = CO + NO$	1.2×10^{14}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + N_2 = CO + N_2$	5.4×10^{12}	Лит.
$CO(a^3\Pi_r) + H_2 = CO + H_2$	1.1×10^{14}	Лит.
radiative quenching		
$CO(a^3\Pi_r) = CO$	200 s^{-1}	Лит.



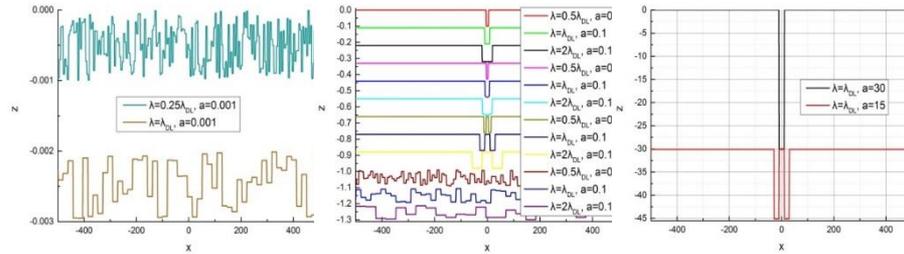
Влияние начальных возмущений на динамику ускорения неустойчивых газовых пламён

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

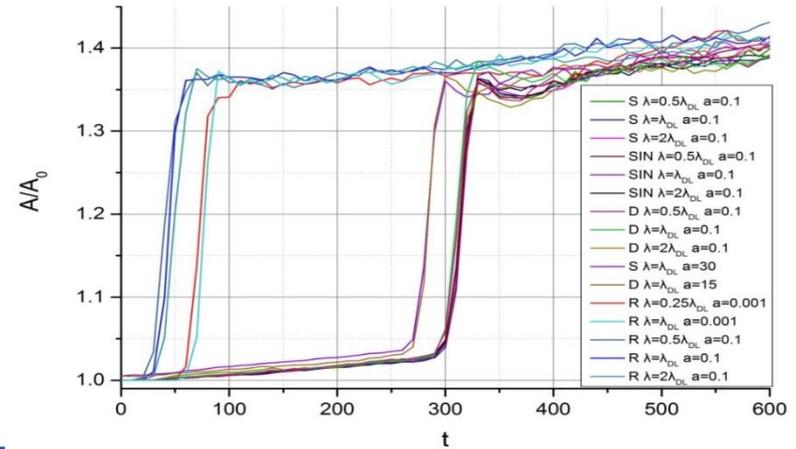
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Модель включала численное интегрирование уравнения Сивашинского в плоской 2D постановке:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + Ze^2(1 - Le)^2 \nabla^4 \phi + \left(\frac{1}{2} Ze(1 - Le) - 1 \right) \nabla^2 \phi + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 = \frac{\theta - 1}{8\pi^2 \theta} \int_{-\infty}^{\infty} |k| \exp(ik(x - z)) \phi(z) dk dz.$$



В качестве начальных возмущений использованы: случайные возмущения различной интенсивности и частотного диапазона, единичные и двоянные возмущения прямоугольной и синусоидальной формы с различными значениями ширины и амплитуды.

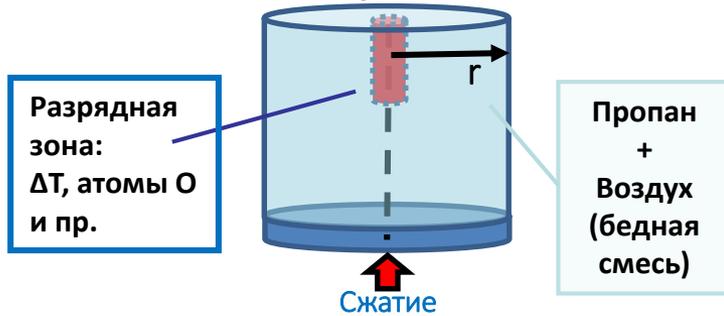


Полученные зависимости от времени отношения поверхности искривлённого неустойчивого пламени к гладкому позволили рассчитать скорости фронта пламени. Полученный разброс скоростей в 17.7% хорошо согласуется с экспериментальным разбросом в 17%, полученным нами в 2020г. Результаты объясняют наблюдаемый экспериментально разброс параметров ускорения газовых пламён.

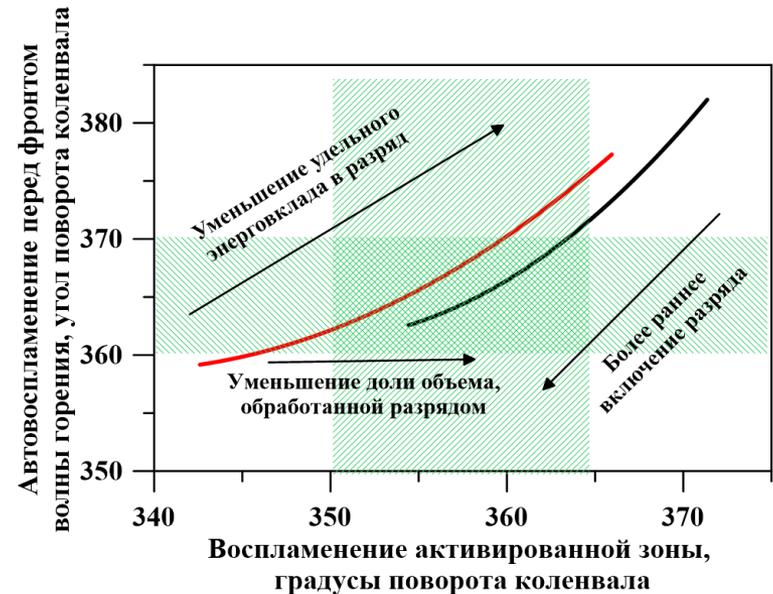


Управление авто-воспламенением в компрессионном двигателе при помощи неравновесного коронного разряда

Двигатель с компрессионным сжатием:



- Разряд **инициирует волну горения**, которая приводит к **авто-воспламенению** топливной смеси во всём объеме двигателя.
- Временем авто-воспламенения можно **управлять**, варьируя параметры разряда.



Filimonova, E.A., Dobrovolskaya, A.S., Bocharov, A.N., Bityurin, V.A., Naidis, G.V.

Combustion and Flame, 2020. 215. pp. 401-416.

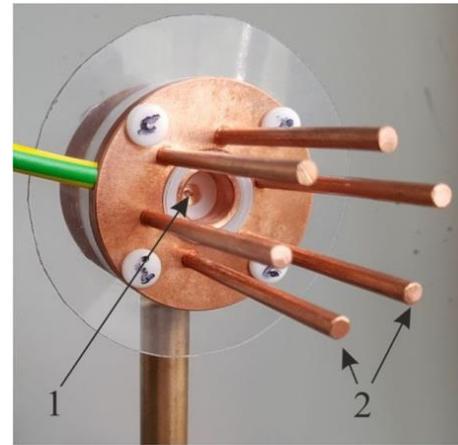
Formation of combustion wave in lean propane-air mixture with a non-uniform chemical reactivity initiated by nanosecond streamer discharges in the HCCI engine



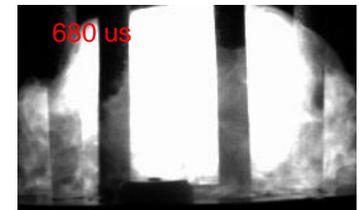
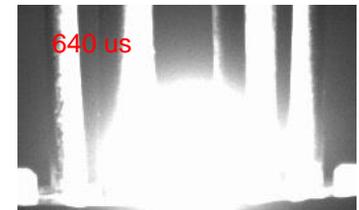
Получение высокоскоростных струй плотной плазмы в комбинированном разряде на основе магнитоплазменного компрессора (МПК) и капиллярного разряда

Впервые реализована схема комбинированного разряда на основе магнитоплазменного компрессора и импульсного капиллярного разряда для получения высокоскоростных струй плотной плазмы. Метод позволяет увеличить верхний предел устойчивой работы МПК до 1 атм, а также реализовать возможность эффективной подачи рабочего тела заданного состава в зону плазменного фокуса.). Метод открывает возможность изучения плазмы, содержащей наноразмерные кластеры, в широком диапазоне давлений и температур, и представляет интерес для приложений магнитоплазменной аэродинамики, проблем инерциального термоядерного синтеза и др.

Динамика развития комбинированного разряда МПК при атмосферном давлении



1 – капиллярный разрядник, 2 – аноды МПК



Brovkin V.G., Vedenin P.V., Mashek I. Ch., Ryazanskiy N.M.

Journal of Physics: Conf. Series. V. 1394, p. 012029 (2019).

Pashchina A.S., *Journal of Physics: Conf. Series. V. 1698, 012008 (2020).*

Лаб. 21.2 - экспериментальных исследований гетерогенных плазменных потоков

Зав. лаб. к.ф.-м.н. Пащина Анатолий Степанович

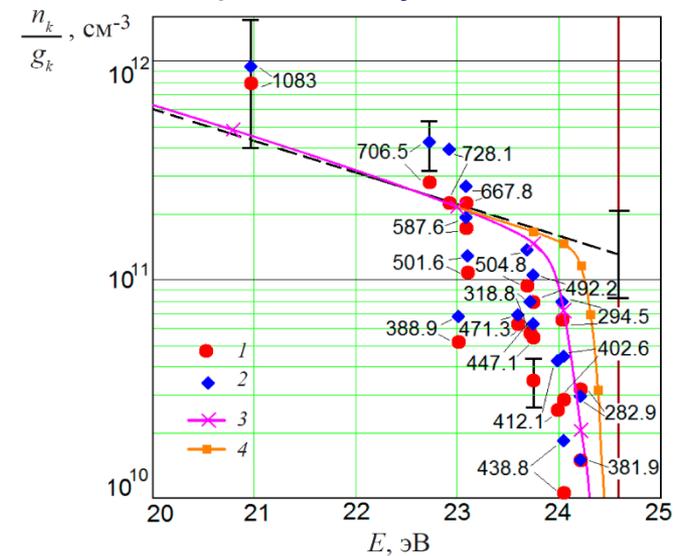
Рук. работы: в.н.с., д.ф.-м.н. Климов Анатолий Иванович, в.н.с., к.т.н. Бровкин Вадим Геннадиевич



Экспериментальное обнаружение явления снижения вероятности реализации возбужденных состояний атомов в электродуговой плазме гелия атмосферного давления

Впервые получено экспериментальное подтверждение предсказанного ранее явления снижения вероятности реализации высоковозбужденных состояний атомов в плазме гелия атмосферного давления и наличия в такой плазме неравновесного распределения возбужденных состояний ионизационного характера. Наблюдаемое явление объясняется наложением квазистатического (ионного) микрополя плазмы на поле взаимодействия внешнего электрона с атомным остовом. Полученные результаты имеют важное научное и практическое значение для развития численных моделей и методов спектральной диагностики неравновесной низкотемпературной плазмы.

Заселенности атомных уровней сильноионизованной дуговой плазмы гелия атмосферного давления при токах дуги 200 (1) и 400 А (2) в зависимости от энергии возбуждения



Коршунов О.В., Чиннов В.Ф., Кавыршин Д.И. *ТВТ*, Т.57, №2, с.164-173, 2019.

Шавелкина М.Б., Амиров Р.Х., Кавыршин Д.И., Чиннов В.Ф., *ТВТ*, Т.58, Вып. 3, с.327-335, 2020.

Лаб. 21.2 - экспериментальных исследований гетерогенных плазменных потоков

Зав. лаб. к.ф.-м.н. Пащина Анатолий Степанович

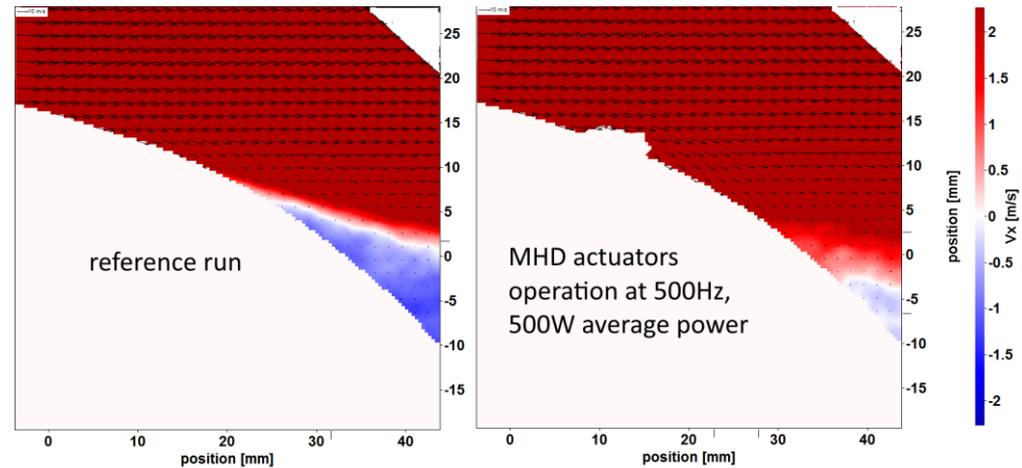
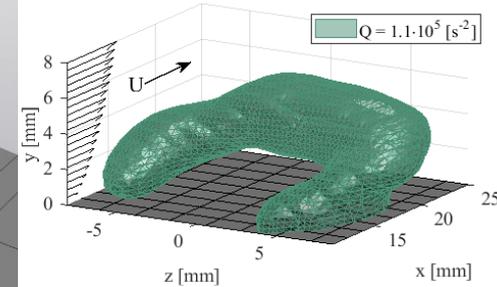
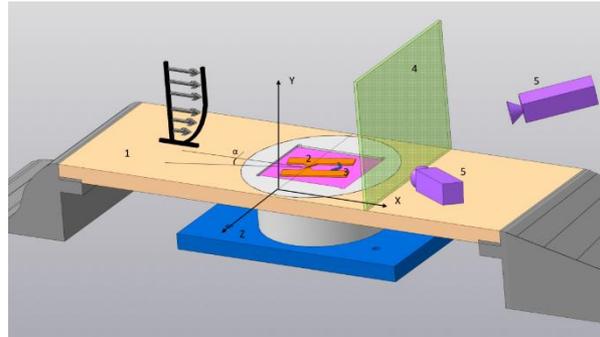
Рук. работы: г.н.с., д.ф.-м.н. Чиннов Валерий Федорович, с.н.с., к.ф.-м.н. Кавыршин Дмитрий Игоревич



Управление пограничным слоем с помощью дугового разряда в магнитном поле

Изучена возможность интенсификации пристенных течений с помощью дугового разряда в магнитном поле. Показана возможность формирования в пограничном слое подковообразных вихрей с характерным значением скорости до 30м/с при токах в дуге до 100А и полях до 0.3 Тл.

Продемонстрировано управление профилем скорости в турбулентном пограничном слое при скорости до 80м/с и $Re \sim 10^5$, а также влияние актуатора на отрыв потока на гладкой стенке.



Moralev I, Kazanskii P, Bityurin V, Bocharov A, Firsov A, Dolgov E and Leonov S

J. Phys. D: Appl. Phys., 53(42), 425203, 2020.

Gas dynamics of the pulsed electric arc in the transversal magnetic field

Спасибо за внимание!

