

# Ефективність збудження кільцевого геліконного джерела плазми

*М. А. Бєлошенко, К. П. Шамрай*

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Геліконні джерела, які є найефективнішими, економічними генераторами густої плазми, інтенсивно досліджуються для створення плазмових двигунів для космічних апаратів. В одній із запропонованих схем геліконний розряд слугує в якості передіонізаційного ступеня для плазмового двигуна холлівського типу (ДХТ). В цій схемі геліконне джерело має бути геометрично пристосовано до ДХТ, тобто мати кільцеву форму в поперечному перерізі. На відміну від досить детально досліджених звичайних геліконних джерел з круговим перерізом, кільцеві джерела досліджені мало.

В роботі теоретично проаналізовано збудження електромагнітних полів і поглинання ВЧ потужності в плазмі кільцевого джерела при використанні зовнішньої чи внутрішньої антени; результати порівняно з випадком звичайного джерела таких самих розмірів. Показано, що опір плазмового навантаження (ефективність поглинання потужності) значно вищий при збудженні зовнішньою антеною, у порівнянні із внутрішньою, і такого ж порядку, як для звичайного джерела таких самих розмірів. Але залежність опору від густини плазми плавніша, ніж для звичайного джерела, що свідчить про пригнічення резонансів збудження поздовжніх хвильових мод.

# Розв'язок рівнянь нелокальної кінетики при дифузному розсіянні іонізуючих електронів

*В.В. Горін*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

## Решение уравнений нелокальной кинетики при диффузном рассеянии ионизирующих электронов

*В.В. Горин*

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко*

Пусть:  $R$  - габаритный размер устройства со стационарным тлеющим разрядом,  $\lambda_{tr} = (N\sigma_{tr})^{-1}$  - транспортная длина упругого рассеяния электрона на атомах газа,  $\lambda_{in} = (N\sigma_{in})^{-1}$  - средняя длина пробега электрона между двумя последовательными неупругими столкновениями с атомами газа,  $\lambda = \min\{\lambda_{in}, \sqrt{\lambda_{in}\lambda_{tr}}\}$  - среднеквадратичное смещение электрона между двумя последовательными неупругими столкновениями с атомами газа. Область *локальной* кинетики ионизирующих электронов: 1)  $\lambda \ll R$ , область *нелокальной* кинетики: 2)  $\lambda$  больше либо одного порядка с  $R$ , причём, крайнее соотношение: 3)  $\lambda \gg R$  - «полностью» *нелокальная* кинетика (Цендин, УФН - 2010). Варианты 2 и 3 соотношений этих параметров охватываются универсальной математической моделью Горина (EPJD - 2010), для которой аналитические варианты являются предельными асимптотическими упрощениями.

В настоящей работе изучено асимптотическое решение задачи для варианта 3. Получены общие формулы решения кинетического уравнения для ионизирующих электронов в тлеющем разряде произвольной конфигурации в приближении *эргодичности* движения электронов вдоль энергетической гиперповерхности. Оказалось, что в этом приближении источник ионизации является функцией одной скалярной переменной – электрического потенциала, функция распределения электронов также является функцией одной скалярной переменной – полной механической энергии электрона. Полностью нелокальная кинетика электронов в тлеющем разряде имеет место при низких давлениях газа в диапазоне энергий электронов от первого возбуждённого уровня атома до нескольких десятков электронвольт, когда сечения неупругих процессов начинают достигать величин, сравнимых с сечениями упругих процессов рассеяния.

# Вплив обертання плазми на спектри гвинтових мод циліндричного пінча з малим запасом стійкості

*А. А. Гурин*

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Сформульовано спектральну крайову задачу для гвинтових МГД коливань ідеальної циліндричної плазми пінча з довільними двокомпонентними полями магнітної індукції та швидкості обертання плазми:  $(0, B_\theta(r), B_z(r))$  та  $(0, V_\theta(r), V_z(r))$ . Запропоновано самоузгоджену квазілінійну модель рівноваги пінча на основі усереднених рівнянь МГД теорії, що враховують іон-атомні зіткнення та внесок квадрата амплітуди гвинтових мод, й визначають конвекцію плазми, індуковану коливаннями. Показано, що в пінчі з великим струмом й малим запасом нестійкості,  $q \ll 1$ , обертання плазми, індуковане нестійкою гвинтовою модою типу кінка  $m=1$ ,  $n \approx 10$ , веде до насичення її власної амплітуди. Для внутрішніх резонансних мод високий порядок нелінійності параметрів крайової задачі по  $V_\theta(r)$  веде до загострення ефекту локалізації обертання на резонансній поверхні при дуже малих значеннях амплітуд коливань й швидкості обертання в приосьовій та периферійній плазмі. Запропонована модель самоузгодженої стабілізації гвинтових коливань відповідає деяким рисам рівноваги парамагнітної конфігурації, спостереженої в пінчах з оберненим полем в “квазіодномодовому” режимі коливань, але свідчить, що для побудови вичерпної теорії рівноваги цих пінчів потрібно враховувати обмеження ефектів диференційного обертання в’язкістю плазми.

# Реконструкція розподілу параметрів електромагнітних хвиль свистового діапазону в плазмі магнітосфери Землі

Ю. Залізник<sup>1</sup>, О. Агапітов<sup>2</sup>, В. Красносельскіх<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ, Україна*

<sup>2</sup>*Національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна*

<sup>3</sup>*Лабораторія фізики і хімії навколосезного простору, м. Орлеан, Франція*

Хвильові емісії типу вістлерових хорів керують процесами квазілінійної дифузії енергійних заряджених частинок, захоплених у радіаційні пояси Землі. Для коректного обчислення коефіцієнтів квазілінійної дифузії необхідно знати розподіл амплітуд та хвильових векторів електромагнітних хвиль для усіх магнітних широт всередині радіаційного поясу. Хори вістлерів часто реєструються електричними та магнітними датчиками на штучних супутниках Землі, зокрема, великий об'єм таких вимірювань, достатній для побудови статистики вістлерових подій, був отриманий на космічних апаратах проектів «Cluster» та «THEMIS». Метою даної роботи є відновлення розподілу параметрів вістлерів у радіаційних поясах та у внутрішній магнітосфері Землі як за допомогою обробки результатів безпосередніх супутникових спостережень, так і за допомогою комп'ютерного моделювання розповсюдження електромагнітних хвиль від приєкваторіальної області їхньої генерації до вищих магнітних широт в рамках методу геометричної оптики із реалістичними розподілами густини компонент магнітосферної плазми та геомагнітного поля. Прямим порівнянням результатів моделювання із спостережуваними даними показано, що розподіли хвильових векторів, отримані за допомогою чисельного моделювання, добре відтворюють дані спостережень, та, відповідно, можуть використовуватися у тих просторових областях внутрішньої магнітосфери, для яких спостережувані хвильові дані недоступні, неповні чи недостовірні.

## Деякі плазмові аспекти сонячно-земних зв'язків

*А.І. Кнуренко, Є.В. Мартиш*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
радіофізичний факультет*

Відомо, що одним з основних каналів зв'язку між Сонцем та Землею є т.зв. сонячний вітер (СВ). В загальних рисах – це радіальний потік іонів та електронів. Хоча він існує постійно, біля орбіти Землі він є досить сильно розрідженим та змінним. Середні значення: концентрації біля  $1-10 \text{ см}^{-3}$ , швидкості - 250-1000 км. Величина міжпланетного магнітного поля -  $(1-10) \times 10^{-9}$  Тесла. Міжпланетне магнітне поле „відмикає” магнітосферу Землі та з'єднує геомагнітне поле з сонячним магнітним полем. Зміни у сонячній активності передають свій вплив, в основному, саме цим шляхом. Широковідомі магнітні бури мають безпосередній зв'язок зі спалахами сонячної активності, тобто з потраплянням Землі в область аномально інтенсивного СВ та до міжпланетних магнітних хмар. Зрозуміло, що під час цих подій геомагнітне поле зазнає великих збурень. Існує багато спостережень негативного впливу таких збурень на різні макроскопічні природні та штучні системи на Землі та на її біооб'єкти.

Висновки про залежність самопочуття людей від магнітних бур підтверджуються статистичними даними: наприклад кількість викликів „швидкої допомоги”, госпіталізацій у зв'язку зі загостреннями серцево-судинних захворювань очевидним чином збільшується в різних фазах магнітних бур. Проте зараз можна стверджувати, що сам механізм реагування людських організмів на ці прояви сонячної активності не є відомим. Це не в останню чергу походить від того, що не знайдені органи чи структури тіла людини, які безпосередньо реагують на магнітне поле.

Але проведені в кінці ХХ сторіччя дослідження київської біофізичної школи показали суттєву відмінність біоефектів від випромінювання у міліметровому діапазоні від інших впливів на живе, в тому числі і від дії електромагнітних полів з довжинами хвиль в інших діапазонах. Зокрема, використовуючи такі частоти, можна переводити організм як цілісну макроскопічну систему із метастабільного в основний стан і навпаки.

В період сонячних спалахів та магнітних бур кількість заряджених частинок в іоносфері помітно зростає, причому дуже нерівномірно. Головна причина – це спалахові енерговиділення й ежекції корональної маси. Останні формують гігантські плазмоїди, які можуть рухатись у напрямку Землі із швидкостями, більш ніж 2000 км/с. Безумовно, ці події визначаються, як екстремальні збурення СВ. Вони викликають появу плазмових згущень та додаткових плазмових прошарків в іоносфері. Час їх існування становить кілька годин, в залежності від типу магнітної бури. Така ситуація спричиняє різке збільшення рекомбінаційного випромінювання саме у міліметровому та інфрачервоному діапазонах. Спектр цього випромінювання має смуговий характер, тому що формується рідбергівськими станами атомів та молекул іоносфери. Оцінки його параметрів та умов проходження в цей період доводять можливість суттєвого впливу збуреної іоносфери на стан організму людини завдяки вище згаданому механізму.

# Підвищена генерація плазми та нестійкість Вейбеля в плазмі індукційного джерела

*А. І. Кобза<sup>1,2</sup>, К. П. Шамрай<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup>*Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ*

Індукційні джерела дозволяють генерувати низькотемпературну плазму високої густини і тому є ефективними інструментами для різних плазмових технологій. Вклад потужності в плазму індукційного джерела здійснюється за рахунок скінуючого електромагнітного поля, яке збуджується зовнішньою ВЧ струмовою антеною. Взаємодія електронів з неоднорідним скінуючим полем призводить до їх стохастичного нагрівання, яке може бути ефективнішим за звичайне джоулеве нагрівання. Функція розподілу стохастично нагрітих електронів, звичайно, є нерівноважною, що може бути причиною різноманітних нестійкостей.

В роботі розраховано функції розподілу стохастично нагрітих електронів за різних умов. Показано, що такі електрони здатні забезпечити темп іонізації робочого газу, що може в рази перевищувати темп іонізації первісних максвелівських електронів. Обчислено характеристики (інкременти та характерні хвильові числа) вейбелевої нестійкості, яка має збуджуватись внаслідок анізотропії розподілу стохастично нагрітих електронів. Виявлено необхідні умови виникнення нестійкості – коли максимальний інкремент перевищує обернений час ізотропізації розподілу на зіткненнях.

# РІВНЯННЯ ДЛЯ ДРЕЙФОВО-АЛЬФВЕНОВИХ ТА ДРЕЙФОВО-ЗВУКОВИХ ВЛАСНИХ МОД У ТОРОЇДАЛЬНІЙ ПЛАЗМІ

*Я.І. Колесниченко, Б.С. Лемякко, Ю.В. Яковенко*

Нещодавно теоретично було передбачено існування дрейфово-звуконних власних мод (DSE – drift-sound eigenmodes), а також нового типу дрейфово-Альфвенонних власних мод (DAE – drift-Alfvén eigenmodes) – мод, для яких виконується умова  $\omega \sim \omega_{*i}$  (де  $\omega$  – частота моди,  $\omega_{*i}$  – йонна діаманітна дрейфова частота) [1]. Моделювання окремих розрядів стеларатора Wendelstein 7-AS в значній мірі підтверджує існування цих мод [1]. Важливим фактом є те, що йонне загасання Ландау DSE-мод є слабким навіть при дуже малому поздовжньому хвильовому числі ( $k_{\parallel}$ ), що сприяє дестабілізації цих мод енергійними частинками – на відміну від ВААЕ-мод ( $\beta$ -induced Alfvén-acoustic eigenmodes), для яких характерне сильне загасання в ізотермічній плазмі (проте, ймовірно, ВААЕ спостерігалися в експериментах з великою густиною йонного пучка на сферичному торі NSTX [2]).

Рівняння для DSE та DAE, наведені в роботі [1], строго кажучи, є справедливими лише у випадку, коли  $\omega_G > \omega_{*i,e}$  ( $\omega_G$  – частота геодезичної акустичної моди [3], індекси  $i$  та  $e$  використовуються для позначення величин, які відносяться до йонів та електронів, відповідно). Однак ця умова може порушуватись в реальних експериментах; зокрема, вона не виконувалася в деяких областях плазми розрядів, розглянутих у роботі [1]. З іншого боку, у згаданій роботі виведення базових рівнянь для опису DSE та DAE мод було, фактично, відсутнім, а неоднорідністю температури плазми було знехтувано. Ці обставини спонукали авторів до виконання цієї роботи, у якій рівняння з [1] були узагальнені для випадку довільного співвідношення  $\omega_G/\omega_{*i,e}$  з врахуванням неоднорідності температури плазми, а також детально описаний шлях їх отримання.

Виведені рівняння є придатними для опису DSE та DAE мод як у токамаках, так і в стелараторах. Вони можуть бути використані також для опису низькочастотних хвильових явищ з  $\omega \sim \omega_{*i}$  у інших лабораторних пристроях і у космічній плазмі, для яких неоднорідність магнітного поля є істотною.

1. Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, Yu.V. Yakovenko *Europhysics Letters* **85**, 25004-pl (2009).
2. N.N. Gorelenkov *et al.* *Plasma Phys. Control. Fusion*, **38**, 2011 (1996).
3. N. Winsor, J.L. Johnson, J.M. Dawson *Phys. Fluids* **11**, 2448 (1968).

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОЧАСТИНОК $\text{CaCO}_3$ НА ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ

*Ю.В.Лаврукевич, В.Я.Черняк, Т.Є.Лиситченко.*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, радіофізичний факультет, 03127, Україна, м. Київ, просп. академіка Глушкова, 4Г.*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЧАСТИЧЕК $\text{CaCO}_3$ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ

*Ю.В.Лаврукевич, В.Я.Черняк, Т.Е.Лиситченко.*

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, радиофизический факультет, 03127, Украина, г. Киев, просп. академика Глушкова, 4Г.*

Пылевая плазма представляет собой ионизированный газ, содержащий частицы конденсированного вещества [1]. Пылевые частички способны изменять параметры плазмы. В большинстве работ исследование пылевой плазмы, как правило, проводят в предположении химической инертности пыли, когда взаимодействие пылевых частиц с плазмой происходит за счёт физических процессов, а не химических превращений. Однако, для некоторых приложений важно рассмотрение пылевых частиц, которые нельзя считать химически инертными. Поэтому для нас представляют интерес исследования влияния пылевых частиц на параметры плазмы, материалом которых является  $\text{CaCO}_3$ . В данной работе с помощью зондовой и оптической диагностики изучается влияние пылевых частиц на параметры плазмы. Также продемонстрировано зависание пылевых частиц в стратах тлеющего разряда.

Установка, с помощью которой производились исследования, описана в [2]. Рабочая камера представляет собой U-образную трубку с электродами. К верхнему фланцу прикреплена кошелка, позволяющая вводить пылевые частицы в разрядный промежуток. Для исследования параметров плазмы и напряженности электрического поля в установке размещены лэнгмюровские зонды. В качестве пылинок использовались частички размельченного мела. Рабочим газом был аргон.

В результате измерений были получены вольтамперные характеристики тлеющего разряда для разных давлений рабочего газа. Данные характеристики измерены и в условиях пылевой плазмы.

Диагностика параметров плазмы производилась с помощью зондового метода [3]. Наложение двух полулогарифмических зависимостей зондового электронного тока в чистой и пылевой плазме показывает, что угол наклона данной характеристики для пылевой плазмы меньше чем для чистой. Таким образом, можно сделать вывод, что введение пыли в разряд увеличивает температуру электронной составляющей плазмы. Влияние же пылевых частиц на концентрацию заряженных частиц плазмы установлено не было. С помощью оптического спектрометра были измерены спектры излучения одной из страт в запыленном и в чистом разряде. Также была зафиксирована левитация пылевых частиц в страте тлеющего разряда.

1. Tsytoich V.N., Usp. Fiz. Nauk, 167 57 (1997).

2. Lavrookevich Yu.V., Lisitchenko T.E., Chernyak V.Ya., Properties of dusty plasma of the discharge with the hollow cathode, III CESPC, August 23 - 27, 2009, Kyiv, Ukraine.

3. Черняк В.Я. Методические указания к лабораторным работам по курсу "Физическая электроника" – Киев, 1986.



## Двовимірні нелінійні локалізовані структури – азимутони

*В. М. Лашкін<sup>1</sup>, О. А. Островська<sup>2</sup>, А. С. Десятников<sup>2</sup>, Ю. А. Ківшар<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Інститут ядерних досліджень, Київ, Україна*

<sup>2</sup>*Австралійський національний університет, Канберра, Австралія*

## Двумерные нелинейные локализованные структуры – азимутоны

*В. М. Лашкин<sup>1</sup>, Е. А. Островская<sup>2</sup>, А. С. Десятников<sup>2</sup>, Ю. А. Кившар<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт ядерных исследований, Киев, Украина*

<sup>2</sup>*Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия*

Впервые численно найдены азимутоны – структуры с топологией промежуточной между мультисолитонами и вихрями (модулированный по азимуту тор). Как и вихри, азимутоны являются вращающимися структурами и несут ненулевой угловой момент. Показано, что азимутоны устойчивы по отношению к шуму, если их угловая скорость вращения превышает некоторое критическое значение. Ранее существование азимутонов предсказывалось только приближенным вариационным методом. Продемонстрирована генерация азимутонов методом фазового импринтинга.

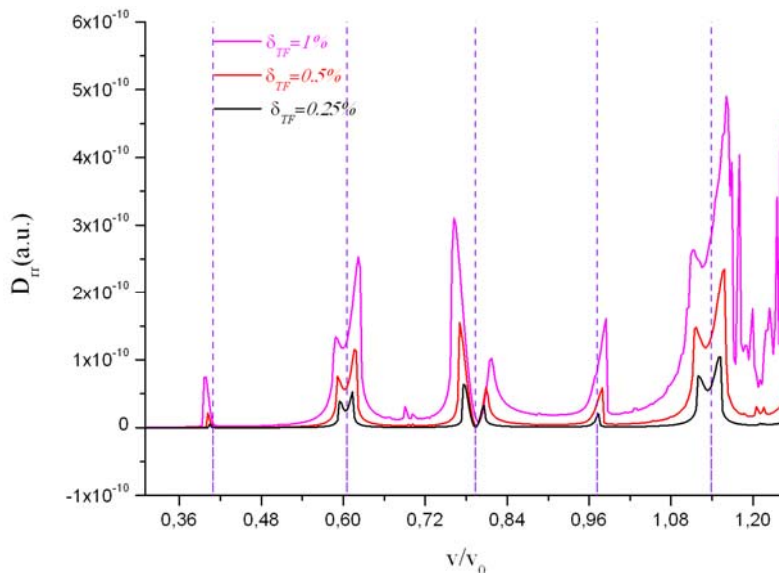
# Симплектичне моделювання поведінки термоядерних альфа частинок в токамаках при наявності гофрованої магнітного поля та неокласичних тірінг мод

*Х.Маджид<sup>1</sup>, К.Шопф<sup>1</sup>, В.Я.Голобородько<sup>2</sup>, В.О.Яворський<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут теоретичної фізики Університету м. Іннсбрук, Австрія, м. Іннсбрук

<sup>2</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, Україна, м. Київ

В даній роботі розвинуто і застосовано симплектичний алгоритм інтегрування траєкторій руху Гамільтонових систем для розрахунків дрейфових орбіт термоядерних альфа частинок в токамаці-реакторі типу ITER та обчислення коефіцієнту їх радіальної дифузії при наявності збурень електричного та магнітного полів. А саме, за допомогою вказаного чисельного методу досліджено сумісний вплив гофрованої магнітного поля токамака та низькочастотних МГД збурень з низькими хвильовими числами на радіальну дифузію швидких альфа частинок. Досліджено залежність коефіцієнту радіальної дифузії від енергії частинок, амплітуди збурень магнітного поля та їх локалізації. Знайдено, що для фіксованої точки старту частинки, коефіцієнт гофрованої дифузії має М-форму, як зображено на Мал.1. Для малих величин гофрованої дифузії така форма зникає при осередненні по тороїдальному куту та зберігається, коли гофровка перевищує критичне значення. Ці результати якісно узгоджуються з висновками робіт [1,2]. Показано, що наявність неокласичних тірінг мод в плазмі призводить до модифікації коефіцієнту гофрованої дифузії та, в залежності від амплітуди моди та її локалізації, веде до його підсилення або послаблення.



Мал.1. Залежність коефіцієнту радіальної дифузії, що викликається наявністю гофрованої магнітного поля, від швидкості альфа частинок для різних амплітуд гофровки. Пунктиром позначені швидкості, що відповідають резонансам між баунс частотою та частотою прецесії з номерами 2...6.  $V_0$  – швидкість альфа частинки при народженні.

1. M.Mimata et.al., Plasma and Fusion Res. **4**, 008 (2009)
2. V.Yavorskij et.al., Nucl. Fusion **50**, 084022 (2010)

# SPLITTING OF THE $m=n=1$ MODES IN HYBRIDS WITH $q_{min}<1$

V.S. Marchenko and S.N. Reznik

*Institute for Nuclear Research, Kyiv, Ukraine*

It is well known that long duration of the discharge in fusion relevant plasmas requires high bootstrap fraction, which inevitably leads to the safety factor profiles with a weak or reversed magnetic shear in the central core.

Sometimes in such plasmas the off-axis minimum of the safety factor,  $q_{min}$ , drops below unity, while on axis  $q_0 \sim 1$  (the latter property attributes these plasmas to the broader class of the so called “hybrid” discharges, which have attracted much attention in tokamak research during last years [1]). Appearance of the two  $q=1$  surfaces is often accompanied by the frequency splitting on different diagnostics of the (1, 1) activity [2, 3]. Such splitting is a manifestation of a simultaneous excitation of the two possible eigenmodes, first noted in Ref. [4]. The purpose of the present work [5] was to calculate the frequency splitting in plasmas with sheared toroidal rotation, and to reveal the doublet instability domain in a parameter space.

The final expression for the frequency splitting is given by

$$\Delta\omega = s_1 s_2 \frac{(\omega_{T1} - \omega_{T2})(X_1^2 - X_2^2)}{(s_1 X_1^2 + s_2)(s_1 X_2^2 + s_2)}, \quad (1)$$

where  $\omega_{T1,2}$  is the toroidal rotation frequency at  $r_{1,2}$

with  $q(r_{1,2})=1$  and  $r_2 > r_1$ ,  $s_{1,2} = |r_{1,2} q'_{1,2}|$ , and

$X = \xi_{01} / \xi_{12} - 1$  with  $\xi_{01}(\xi_{12})$  the amplitude of the “top hat” radial displacement in the interval  $[0, r_1]$  ( $[r_1, r_2]$ ). The eigenmode structure parameters  $X_{1,2}$  for the two possible eigenmodes are determined by extremization of the growth rate with respect to  $X$ .

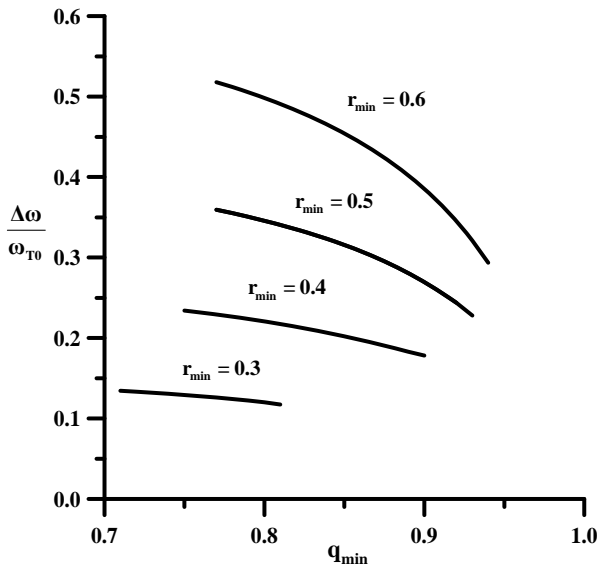


Fig. 1. Frequency splitting versus  $q_{min}$  for various  $r_{min}/a$  and  $q_0=1.2$

Frequency splitting normalized to the on-axis rotation frequency is shown in Fig.1 for parabolic pressure and rotation profiles. For smaller  $r_{min}$  with  $q(r_{min})=q_{min}$  splitting persists at lower values of  $q_{min}$ , but variation with  $q_{min}$  is stronger for larger  $r_{min}$ . Splitting for various  $q_0$  and  $r_{min}/a=0.4$ , with  $a$  the minor plasma radius, is shown in Fig.2. When  $q_0 \rightarrow 1+0$ , the range of the splitting variation is limited due to appearance of the second doublet stability at large  $q_{min}$ .

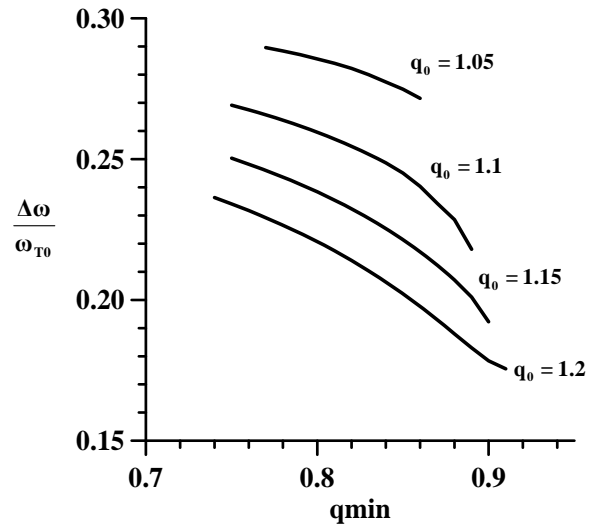


Fig. 2. Frequency splitting versus  $q_{min}$  for various  $q_0$  and  $r_{min}/a=0.4$

In summary, the  $m=n=1$  double-eigenmode instability in tokamak plasmas with  $q_{min}<1$  but  $q_0>1$  has been investigated. The doublet instability domain in the parameter space has been established under assumption of subsonic rotation, and frequency splitting induced by rotation shear has been calculated. The obtained results can explain splitting in hybrids with reversed magnetic shear, which was observed in real experiments [2, 3].

This work was carried out in the framework of Project No.4588 of the Science and Technology Center in Ukraine.

## References

1. E. Joffrin, Plasma Phys. Control. Fusion **49**, B629 (2007).
2. S. Günter *et al.*, Nuclear Fusion **43**, 161 (2003).
3. C.C. Petty *et al.*, Nuclear Fusion **50**, 022002 (2010).
4. R.J. Hastie *et al.*, Phys. Fluids **30**, 1756 (1987).
5. V.S. Marchenko and S.N. Reznik, Phys. Plasmas **17**, 084503 (2010).

Поглинання потужності в плазмовому іонному  
джерелі геліконового типу

*С. М. Мордик<sup>1</sup>, В. І. Мирошніченко<sup>1</sup>, О. В. Алексенко<sup>1</sup>, В. Ю. Сторіжко<sup>1</sup>  
К. М. Степанов<sup>2</sup>, В. В. Ольшанський<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*м. Суми, Інститут прикладної фізики НАН України*

<sup>2</sup>*м. Харків, ННЦ ХФТІ НАН України*

Поглощение мощности в плазменном ионном  
источнике геликонного типа

*С. Н. Мордик<sup>1</sup>, В. И. Мирошниченко<sup>1</sup>, О. В. Алексенко<sup>1</sup>, В. Е. Сторижко<sup>1</sup>  
К. Н. Степанов<sup>2</sup>, В. В. Ольшанский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*г. Сумы, Институт прикладной физики НАН Украины*

<sup>2</sup>*г. Харьков, ННЦ ХФТИ НАН Украины*

Решается задача поглощения мощности в плазменном ионном источнике геликонного типа. Для расчетов выбран источник ионов, который сейчас используется в качестве инжектора ядерного микронда ИПФ НАН Украины. Результаты получены для водородной и гелиевой плазмы.

Цилиндрический источник плазмы находится во внешнем продольном (вдоль оси цилиндра) однородном магнитном поле. Возбуждение источника происходит поперек внешнего магнитного поля. Рабочая частота  $\omega$  источника находится в диапазоне  $\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce} < \omega_{pe}$  и равна  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  (рад/сек);  $f = 27,12$  МГц.

Найдены значения внешнего однородного магнитного поля для различных плотностей плазмы, при которых поглощение мощности максимально.

Вимірювання параметрів плазми високочастотного джерела іонів  
за допомогою подвійного електричного зонду

*Д.А. Нагорний, С. М. Мордик.*

*м.Суми, Інститут прикладної фізики НАН України*

Измерение параметров плазмы высокочастотного источника  
ионов при помощи двойного электрического зонда

*Д.А. Нагорный, С. Н. Мордик.*

*г.Сумы, Институт прикладной физики НАН Украины*

Дано описание установки измерения параметров плазмы в высокочастотном источнике ионов. Приведена конструкция сканирующего двойного электрического зонда, а также конструктивные изменения в источнике необходимые для проведения описанных измерений. Получены зависимости плазменных параметров для различных режимов работы источника (вводимая мощность и давление рабочего газа) в районе экстрагирующего электрода. Полученные данные сопоставлены с результатами, полученными при помощи СВЧ интерферометрии. С помощью описанной установки определен характер радиального и продольного профилей распределения плотности плазмы для заданных режимов работы в районе между антенной и экстрагирующим электродом. Объектом для исследования выбран источник ионов, который сейчас используется в качестве инжектора ядерного микрозонда ИПФ НАН Украины. Все приведенные результаты получены для водородной плазмы.

# Дослідження параметрів плазми в плазмово-рідинній системі із зворотно вихровим потоком типу „торнадо”

*О.А. Недибалюк, В.Я. Черняк, С.В. Ольшевський*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

*e-mail: [anedybaliuk@gmail.com](mailto:anedybaliuk@gmail.com), [chernyak\\_v@ukr.net](mailto:chernyak_v@ukr.net)*

Для створення плазми в плазмово-рідинних системах атмосферного тиску використовуються різні типи розрядів: тліючий, дуга, поперечна дуга, ковзаюча дуга і т.п. Але дані розряди не є досить стабільними. Стабілізація розряду в потужних плазмотронах високого тиску відбувається вихровим потоком газу [1]. В малопотужних розрядах високого тиску використовується зворотно вихровий потік типу „торнадо” (ЗВПТТ) для просторової стабілізації [2]. Але дослідження останнього проводилися тільки для розрядів, в яких використовувалися тверді електроди. Розряди стабілізовані ЗВПТТ з рідким електродом не досліджувалися.

В даній роботі представлені результати досліджень параметрів плазми в динамічній плазмово-рідинній системі із ЗВПТТ в залежності від робочої рідини та складу газу, що формує зворотно вихровий потік.

Проводилось дослідження процесів горіння розряду та електролізу води в даній плазмово-рідинній системі.

Виміряно вольт-амперні характеристики розряду в плазмово-рідинній системі (ПРС) із ЗВПТТ в діапазоні струмів 200÷400 мА та потоків повітря 55÷110 см<sup>3</sup>/с. В якості робочих рідин використовувались дистильована вода, розчин С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>ОН в дистильованій воді (біоетанол), етиловий спирт (С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>ОН). Зворотно вихровий потік формувался повітрям або аргонем Ar. Досліджені емісійні спектри плазми розряду в системах дистильована вода-повітря, 25% розчин С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>ОН/Н<sub>2</sub>О - повітря, дистильована вода-аргон Ar, С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>ОН-аргон Ar. Обраховано температури заселення збуджених електронних рівнів атомів та коливальних і обертальних рівнів молекул.

Проведено порівняння даного розряду із поперечною дугою [3] та розрядом в газовому каналі із рідкою стінкою [4].

1. Коротеєв А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотрони: конструкции, характеристики, расчеты: М, - 1993, 286 с.
2. Kalra C.S., Kossitsyn M., Gutsol A. Electrical discharges in the Reverse Vortex Flow – Thornado Discharges // El. Proc. Of 16<sup>th</sup> Int. Symp. on Plasma Chem., Taormina. – 2003.
3. I.V. Prisyazhnevich, V.Ya. Chernyak, V.V. Naumov et al. // Ukr. J. Phys. – 2007, V.52, N11, P. 1061-1067.
4. I.V. Prisyazhnevich, V.Ya. Chernyak, J.D. Scalný et al. Sources of Nonequilibrium Plasma at atmospheric Pressure // Ukr. J. Phys. -2008, V.53, N5, P. 472-476.

## Стимульоване плазмою згорання парафіну

О.А. Недибалюк<sup>1</sup>, В.Я. Черняк<sup>1</sup>, С.В. Ольшевський<sup>1</sup>, О.Ю. Актан<sup>1</sup>,  
С.Г. Орловська<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>2</sup>Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

e-mail: [onedybaliuk@gmail.com](mailto:onedybaliuk@gmail.com), [chernyak\\_v@ukr.net](mailto:chernyak_v@ukr.net)

Парафіни та циклопарафіни є основними компонентами багатьох груп палив нафтового походження та синтетичних. Сьогодні самі по собі парафіни та їх суміші розглядаються як перспективні альтернативні палива, що пов'язано з їх високою калорійністю та хімічною інертністю [1]. Висока калорійність парафінів визначається тим, що вони відносяться до вуглеводнів з простими зв'язками  $C_nH_{2n+2}$ , в яких найбільше співвідношення водню до вуглецю Н/С. Але для спалення парафінів, у зв'язку з їх хімічною інертністю, необхідна додаткова активація горіння. Як відомо, найбільш ефективним засобом активації процесів спалення є плазмове стимулювання горіння. Але для парафінових палив даний підхід практично не досліджений.

В даній роботі наведено результати досліджень стимулювання процесів спалення суміші парафінів за допомогою плазми поперечної дуги [2]. В якості модельної суміші парафінів використано стеарин.

Виміряно вольт-амперні характеристики розряду в діапазоні струмів від 200 до 400 мА та потоків повітря від 55 до 275 см<sup>3</sup>/с для режимів за наявності та відсутності парафіну. Досліджено емісійні спектри факелу плазми та полум'я при різних потоках повітря в діапазоні довжин хвиль від 200 до 1000 нм. Обраховано температуру заселення збуджених обертальних рівнів  $T_r^*$  гідроксилу ОН в плазмовому факелі ( $T_r^* = 2700$  К) та полум'я ( $T_r^* = 2300$  К), за допомогою порівняння експериментальних емісійних спектрів з розрахованими, використовуючи програму SPECAIR. Проведено порівняння температур полум'я стимульованого плазмою з полум'ям свічки, які визначались методом порівняння експериментальних спектрів полум'я з розрахованими за допомогою формули Планка спектрів абсолютно чорного тіла. Також досліджено деякі особливості фазових переходів в парафінах. Виміряно модулі зсуву докозана  $C_{22}H_{46}$  і октодекана  $C_{18}H_{38}$  в процесі плавлення. Досліджено процес стимульованого плазмою горіння чистих парафінів (докозана та октодекана). При проведенні досліджень співвідношення енергії, що витрачається на підтримку плазми до енергії яка виділяється при повному згоранні парафінів складало  $\sim 1/100$ .

1. Dornheim M.A. Ideal hybrid fuel is wax // Aviation week and space technology. - 2003. – 3. - P. 52-54.
2. Недибалюк О.А., Черняк В.Я., Ольшевский С.В. и др.. Сжигание парафина при помощи плазмы // Энергоэффективность-2010, 19-20 October 2010, Kyiv, Ukraine: abstracts. – Kyiv. – 2010 – P. 188-190.

## Особливості протікання імпульсного розряду в повітряно-крапельному середовищі

*С.В.Ольшевський, В.В. Юхименко, В.Я.Черняк, Є.В. Мартиш,  
Радіофізичний факультет, Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка, Україна, Київ 03022, пр-т Глушкова, 4г.*

Плазмово-рідинні системи з розрядами атмосферного тиску, можуть бути використані в таких технологіях, як синтез наночастинок, газифікація органічних відходів та інших. Досить цікавим застосуванням подібних систем для вирішення проблем екології є реформування рідких вуглеводнів, та деструкція стійких токсичних вуглеводневих сполук в водних розчинах. Стимульоване плазмою реформування біопалив є перспективним для отримання збагаченого воднем синтез-газу, спалювання якого відбувається із суттєво меншим утворенням шкідливих сполук  $\text{NO}_x$ – $\text{SO}_x$ . Однак особливість таких систем полягає в тому, що область впливу на процеси в об'ємі рідини обмежується лише приповерхневою зоною контакту плазмової фази з рідиною. Для підвищення ефективності такого впливу доцільно збільшувати співвідношення активної поверхні до об'єму рідини. Одним із способів отримання розвиненої зони контакту плазми з рідиною може бути підтримування електричного розряду в повітряно-крапельному середовищі.

Дана робота присвячена експериментальним дослідженням імпульсного електричного розряду, що протікає в повітряно-крапельному середовищі, отриманому ультразвуковим розпиленням води. Було встановлено, що в системі реалізуються: імпульсний об'ємний розряд в розрядному проміжку, імпульсний поверхневий розряд, що ковзає вздовж внутрішньої діелектричної поверхні камери та об'ємний процес, що супроводжується випромінюванням з іншим спектральним складом, ніж випромінювання розряду. Характерний час тривалості зазначеного процесу лежить в межах від 120 до 533 мс. при довжині імпульсу розрядного струму  $\sim 10$  мкс. Оціночний електричний струм, що протікає крізь систему під час існування довготривалого процесу, на три порядки менший від розрядного струму. Оціночна швидкість розповсюдження границі області світіння досліджуваного процесу  $\sim 0,5$  мс<sup>-1</sup>. Експериментальні дослідження спектрального складу випромінювання розрядної плазми та довготривалого процесу показали, що в розрядних спектрах відсутні молекулярні смуги гідроксилу, проте в спектрах випромінювання довготривалого процесу вони досить інтенсивні. В розрядних спектрах присутні інтенсивні атомарні лінії матеріалу електродів, в той час, як в випромінюванні довготривалого процесу вони, як правило досить слабкі, або взагалі відсутні. Атомарні лінії кисню та водню присутні в емісійних спектрах для обох випадків і оцінена за ними температура заселення електронних станів кисню для розрядної плазми становить 0,7 еВ; для довготривалого процесу – 0,5 еВ.



# Процеси трансформації в замагніченій неоднорідній плазмі з нижньогібридною накачкою

*В. М. Павленко, В. Г. Панченко*

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

В даній доповіді на основі кінетичної теорії флуктуацій досліджена трансформація повздовжніх ленгмюрівських хвиль у поперечні електромагнітні хвилі на флуктуаціях густини неоднорідної замагніченої плазми.

Отримано вираз для коефіцієнта трансформації у випадку параметричного збудження нижньогібридною накачкою дрейфових хвиль. Проведено чисельні оцінки коефіцієнта трансформації для типових параметрів гарячої плазми і показано, що основний вклад в цей коефіцієнт вносить член, обумовлений присутністю хвилі накачки. Встановлено також, що коефіцієнт трансформації повздовжніх хвиль у поперечні істотно залежить від параметрів хвилі накачки (частоти, інтенсивності), що дає змогу керувати процесами випромінювання електромагнітної енергії із плазми.

# ВЛАСТИВОСТІ НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ У ВОДІ ЗА ПІДВИЩЕНОГО ТИСКУ

*П.В. Порицький, П.Д. Старчик*

Інститут ядерних досліджень НАН України

Властивості плазми розрядів у водному середовищі при підвищених тисках залишаються слабо вивченими. Плазма таких розрядів є складним багатокомпонентним середовищем, що контактує з рідиною за високих тисків. Найважливішими чинниками, що обумовлюють властивості неідеальної плазми підводних розрядів є наявність багатьох різновидів частинок у плазмі (електрони, іони, атоми, молекули та складні комплекси), газова та плазмова неідеальності.

В даній роботі розглядається методика розрахунку термодинамічних та транспортних властивостей щільної неідеальної плазми дугових та імпульсних розрядів у водному середовищі у діапазоні тисків 0.1-1000 МПа та температурному діапазоні від температури плавлення до 100 кК. Особливістю є використання розрахункової процедури, яка узгоджує наявність багатьох компонент у плазмі з ефектами газової та плазмової неідеальності. Розрахунки проведено в наближеннях: так званої «нульової густини», тобто «звичайної» кінетичної теорії, та щільної плазми. Розглянута методика розрахунку дозволяє отримувати термодинамічні та транспортні властивості плазмових середовищ підводних розрядів для широкого діапазону тисків та температур.

Розрахунки показали, що поява в плазмі малих домішок речовин з низькими потенціалами іонізації викликає суттєве підвищення її провідності при температурах наближених до іонізаційних. Так провідність водяної плазми при наявності 0,01% атомів металу при  $T \geq 5000$  К на порядок перевищує провідність чистої плазми. Подібне явище викликає перерозподіл густини струму у підводних дугових розрядах, за рахунок розпиленого матеріалу електродів, або контракцію його в зоні розташування випареного матеріалу дротинок у разі застосування останніх для ініціювання розрядів.

## Проникнення ВЧ електростатичного поля у шар замагніченої плазми

*Т. С. Руденко<sup>1,2</sup>, Т. Матсуока<sup>3</sup>, К. П. Шамрай<sup>1</sup>, І. Фунаки<sup>3</sup>, Ш. Шінохара<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

*<sup>2</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ*

*<sup>3</sup>Агентство аерокосмічних досліджень Японії, Канагава*

*<sup>4</sup>Токійський університет сільського господарства і технологій, Токіо*

Дослідження ефективності проникнення ВЧ електростатичного поля в плазму важливе як з фундаментальної точки зору, так і для вирішення багатьох прикладних задач, наприклад, для створення джерел низькотемпературної плазми ємнісного типу для технологій плазмо-хімічної обробки матеріалів. Результати цих досліджень складають основу для розробки прискорювача плазми спеціального типу, Lissajous Helicon Plasma Accelerator (ЛНРА), який уявляється перспективним для застосування в якості плазмового двигуна для космічних апаратів. Для ефективного функціонування цих приладів необхідно забезпечити проникнення в об'єм плазми якомога інтенсивнішого ВЧ поля, перешкодою чому може бути значне падіння ВЧ потенціалу в граничних ненеітральних шарах.

В роботі на основі простої моделі аналітично знайдено ВЧ електростатичне поле, яке збуджується в магнітоактивній плазмі системою ємнісного типу. Показано, що в процесі формування граничних ненеітральних шарів і стаціонарних коливань на частоті збудження також виникають перехідні коливання плазмового типу (так звані геометричні резонанси). Виявлено умови, за яких падіння ВЧ потенціалу в граничних шарах є незначним, внаслідок чого поле ефективно проникає в плазму. Отримано скейлінг поля в плазмі (залежність від параметрів задачі – густини плазми, магнітного поля, прикладеного ВЧ потенціалу, геометричних розмірів). Аналітичні результати порівняно з даними розрахунків на основі РІС коду і показано їх добру узгодженість.

# Кінетика іонів в мікроплазмовому розряді всередині діелектричної комірки

*О.В. Самчук, О.І. Кельник*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, радіофізичний факультет*

Мікроплазмовий розряд в суміші інертних газів широко використовується у плазмових дисплеях (PDP) як джерело ультрафіолетових квантів. Внаслідок складності подібних систем, їхнє теоретичне дослідження практично можливе лише шляхом комп'ютерного моделювання. Для проведення такого моделювання нами була розроблена двовимірна програма із використанням методу частинок в комірках (PiC) з обробкою зіткнень методом Монте-Карло. Моделювання проводилося для типової комірки PDP з розмірами 200\*700 мкм. Два компланарних електроди були розміщені з фронтального боку комірки, а один адресний електрод - з її протилежного боку ортогонально до копланарних електродів. Для моделювання було вибрано режим запалювання розряду із напругою, прикладеною до одного з копланарних електродів, тоді як інші електроди вважалися заземленими. Прикладена напруга змінювалася від -190 В до -290 В. Газова суміш складалася з 95% неону і 5% ксенону при загальному тиску 500 Торр. Метою моделювання було дослідження функцій розподілу для іонів у даному мікроплазмовому розряді.

Час максвелізації для іонів істотно більший ніж для електронів внаслідок значно більшої маси, тому на етапі запалювання розряду функція розподілу іонів за енергіями повинна сильно відрізнитися від рівноважної. Результати моделювання підтверджують цей висновок. Для максимуму розрядного струму функція розподілу за енергіями має схожу форму для всіх сортів іонів і всіх керуючих напруг. Функція розподілу Дрюйвейстейна з великою точністю збігається з отриманим з моделювання розподілом, особливо на її спадній ділянці. Такий розподіл часто зустрічається [1] у випадку газового розряду, в якому максвелізація для певних сортів частинок ще повністю не закінчилася. Ширина розподілу Дрюйвейстейна за енергіями дає оцінку для середньої енергії отриманої кожним іоном між послідовними зіткненнями, і у випадку нашого моделювання складає порядку 2 еВ. Розподіл іонів по компонентах швидкості  $v_x-v_y$  майже ізотропний із незначним зміщенням в напрямку позитивних величин  $v_y$  завдяки прискоренню іонів у напрямку негативного компланарного електрода. Відмінність між енергетичними розподілами електронів і іонів відповідає формуванню неоднорідних просторових структур у розряді всередині діелектричної комірки.

1. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М., Наука, – 1980, – 416с.

# Властивості плазмово-рідинної системи з імпульсним розрядом в газовому каналі з рідкою стінкою

*С.М. Сидорук, В.Я. Черняк, С.В. Ольшевський*

*кафедра фізичної електроніки, радіофізичний факультет, Київський Національний університет імені Тараса Шевченка, просп. ак. Глушкова 4Г, Київ 03122, Україна;*

*ад. ел. пошти: mstquevshoke@ukr.net, chernyak\_v@ukr.net*

Досліджено оптичні, деструктивні та реформуючі властивості плазмово-рідинної системи з імпульсним розрядом в газовому каналі з рідкою стінкою. Дослідження оптичних властивостей виявили, що:

- тривалість імпульсу світіння значно перевищує тривалість імпульсу струму;
- ширина переднього фронту імпульсу світіння плазми залежить від типу плазмоутворюючого газу;
- максимум світіння плазми спостерігається після закінчення імпульсу струму.

Дослідження деструктивних властивостей на моделі водяного розчину фенолу виявили:

- під дією імпульсної плазми у воді напрацьовується перекис водню та відсутні азотна і азотиста кислоти, що характерні для подібних систем постійного струму;
- оцінена енергоефективність деструкції молекули фенолу у розчині і проведено порівняння з енергоефективністю деструкції в інших плазмово-рідинних системах.

Дослідження реформування етилового спирту в плазмово-рідинній системі (ПРС) та в комплексній системі ПРС та построзрядної камери з частково окислювальним піролізом показали:

- немонотонну залежність швидкості генерації синтез-газу від швидкості потоку вхідного газу;
- зміну енергоефективності при зміні величини енергії, що витрачається на генерацію плазми;
- підвищення енергетичної ефективності реформування етилового спирту в синтез-газ (більш ніж в три рази) при використанні комплексного підходу.

## Плазмове реформування вуглеводнів з керованим синфазним співвідношенням

*Ол.В. Соломенко, О.А. Недибалюк, В.Я. Черняк  
КНУ імені Тараса Шевченка, Радіофізичний факультет*

## Плазменное реформирование углеводородов с управляемым синфазным соотношением

*Е.В. Соломенко, О.А. Недыбалюк, В.Я. Черняк  
КНУ имени Тараса Шевченко, Радиофизический факультет*

Технологии с использованием сингаза на сегодняшний день являются весьма актуальными. Синтез-газ (сингаз) представляет собой смесь  $H_2$  и  $CO$ . Известно, что при добавлении сингаза к топливу улучшается эффективность его горения: меньшее время поджига, быстрое распространение волны горения, стабилизация горения, более полное сгорание смеси и уменьшается количество опасных выбросов ( $NO_x$ ). Также сингаз является важным сырьём для синтеза различных материалов и синтетических топлив, таких, как: аммиак, метанол, уксусная кислота, метиловый формиат, диметиловый эфир, синтетический бензин, дизельное топливо и т.д. [1].

Синтез газ может быть получен из угля, нефтяного кокса, биомассы и даже из органических отходов. На сегодняшний день наиболее перспективным является получение сингаза из возобновляемых углеводородных источников. Известно, что для синтеза или катализа различных продуктов требуется различное соотношение  $H_2/CO$  в сингазе (сингазном соотношении). Например, для синтеза метанола соотношение  $H_2/CO$  должно быть 2/1, для уксусной кислоты – 1/1. Именно поэтому важной задачей, помимо создания самого сингаза является умение контролировать соотношение  $H_2/CO$ .

Ныне исследуются различные типы разрядов для реформирования сингаза: коронный разряд, диэлектрический барьерный разряд, микроволновой разряд, тлеющий разряд атмосферного давления, скользящий дуговой разряд. Стандартным подходом для изменения и управления сингазным соотношением при реформировании является добавление  $CO_2$ . Особенный интерес при реформинге жидких углеводородов представляют разряды, которые не требуют дополнительной газификации. К таким разрядам относится разряд типа торнадо с жидким электродом (РТ ЖЭ) [2]. Однако ранее исследовалось получение сингаза в плазмо-жидкостной системе с РТ ЖЭ при реформировании жидких водных растворов спирта с обдувом воздухом. В данной работе в качестве рабочей жидкости использовался дистиллят, а в качестве обдувающего газа –  $CO_2$  в диапазоне потоков газа  $110-220 \text{ см}^3$  и изменении разрядного тока в диапазоне  $260-340 \text{ mA}$ . Разряд при обработке чистого дистиллята горел нестабильно, для стабилизации горения разряда в дистиллят добавлялся  $NaOH$  ( $\sim 0,05 \text{ M}$ ). Добавление  $NaOH$  приводило не только к стабилизации горения разряда, но и к изменению знака дифференциального сопротивления на отрицательный. Были исследованы спектры излучения плазмы междуэлектродного промежутка. Основными компонентами спектра являются  $OH$ ,  $C_2$ ,  $O$ ,  $H$ ,  $C$ ,  $Na$ . Температура заселенности электронных уровней  $\sim 0,35 \pm 0,05 \text{ eV}$ .

### Литература:

1. Xumei Tao, Meigui Bai, Xiang Li, Huali Long, Shuyong Shang, Yongxiang Yin, Xiaoyan Dai. // Progress in Energy and Combustion Science XXX. 2010.
2. O.A. Nedybaliuk, V.Ya. Chernyak, S.V. Olszewski. // PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2010. № 6. Series: Plasma Physics (16), p. 135-137.

# Властивості електричних мікророзрядів в повітрі

Ок.В. Соломенко, І.В. Присяжневич, В.Я. Черняк, В.А. Зражевський,  
Є.В. Мартиш

Радіофізичний факультет, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Останнє двадцятиріччя спостерігається неперервне зростання інтересу до мікророзрядів, для яких характерним є малі геометричні розміри. Сьогодні реалізовано вже дуже багато конфігурацій малорозмірних електричних розрядів як з відкритими металевими електродами, так і прикритими діелектриком електродами, які віднесено до мікророзрядів [1]. Устаткованим для мікророзрядів є виконання двох умов: 1)  $pd \leq 10$  мм.рт.ст. при геометричних розмірах розряду менших за 1 мм [2], де  $p$  – тиск газу і  $d$  – міжелектродна відстань. Для розрядів великої геометрії ( $d > 1$  см)  $pd \leq 10$  торр · см вказує саме на тліючий розряд, в якому дифузія пригнічує розвиток іонізаційної нестійкості, що забезпечує низьку температуру газу і, відповідно, високий рівень нерівноважності плазми тліючого розряду (значне перевищення температури електронів -  $T_e$  над температурою газу -  $T$ ).

Саме з метою генерації нерівноважної плазми атмосферного тиску при низькій температурі газу створювались перші мікророзряди (мікророзряд з полим катодом) [3]. Саме високий рівень нерівноважності мікророзрядної плазми визначає широкий спектр її застосувань сьогодні.

Ще однією характерною ознакою мікророзрядів є позитивність диференційного опору, що має вирішальне значення в технології, оскільки дає можливість живлення великої кількості мікророзрядів від одного джерела живлення без баластних опорів [2].

Повного розуміння фізичних процесів саме характерних мікророзрядній плазмі на сьогоднішній день не існує. Не з'ясовано навіть наскільки глибока аналогія існує між мікророзрядами і такими давно відомими видами тліючого розряду, як утруднений тліючий розряд і капілярний розряд, в яких визначальними є тільки малий розмір вздовж однієї координати [4]. Слід зауважити, що для сучасних мікророзрядів характерна співрозмірність поздовжнього і поперечних розмірів [1, 3].

В даній роботі проведено вивчення вольт-амперних характеристик і емісійних спектрів плазми саме малорозмірного розряду з одним і двома порожнистими електродами ( $d \leq 1$  мм) в повітрі при низькому тиску.

В результаті проведених досліджень показано, що:

1. Електричний мікророзряд з двома порожнистими електродами в повітрі при  $pd \leq 4$  торр · см має позитивний диференційний опір розряду, який зростає при зменшенні  $pd$ .
2. Для мікророзряду з одним порожнистим електродом характерним є суттєвий вплив полярності електродів на диференційний опір розряду.
3. Основними компонентами емісійного спектру плазми мікророзряду при низькому тиску є молекулярні смуги другої позитивної системи азоту.
4. Температура заселення обертальних рівнів молекули азоту у плазмі дослідженого мікророзряду становить  $T_r^*(N_2) \sim 500 \pm 200$  К при тиску  $< 1$  торр.

## Література

1. *Becker K.* Microplasmas: Scientific Challenges, Technological Applications and Limitations //Book of Abstr. 16th SAPP, Podbanske, Slovakia, Jan. 20-25, 2007, P57-60.
2. *Becker K.H., Kogelschatz U., Schoenbach K.H., Barker R.J.* Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure.- Bristol and Philadelphia: IOP Publishing Ltd. 2005, 680 p.
3. *Schoenbach K.H., Verhappen R., Tessnow T., Peterkin F.E., Byszewski W.W.* // Appl. Phys. Lett. **68**, 13 (1996).
4. *Энгель А.* Ионизованные газы – М.: ФМЛ, 1959, с. 332.

# Нагрівання та колективний рух плазмових електронів в процесі розвитку плазмово-пучкової нестійкості

*Д.М. Танигіна, І.О. Анісімов, С.М. Левитський*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, радіофізичний факультет  
Україна, Київ, вул. Володимирська 60, 01033*

Взаємодія електронних пучків із плазмою є одною із найцікавіших задач плазмової фізики. Інтерес до цієї задачі спричинений можливістю використання електронних пучків як зондів для діагностики магнітних та електричних полів в плазмі (включаючи ВЧ поля), а також різноманітними нестійкостями, що збуджуються в плазмово-пучкових системах та призводять до запалювання плазмово-пучкових розрядів [1]. Однак усе розмаїття процесів, що відбуваються під час плазмово-пучкової взаємодії, далеко не обмежується вищезгаданими явищами. Зокрема, деякі кінетичні ефекти, що мають місце в плазмово-пучкових системах, як правило не беруться до уваги під час досліджень. Мета даної роботи – числове дослідження часові еволюції функції розподілу, потоків та температури плазмових електронів, а також просторових розподілів інтенсивності електричного поля та деформації профілю концентрації плазми в однорідній плазмово-пучковій системі. Для цього було проведено комп'ютерне моделювання методом макрочастинок за допомогою модифікованого пакету PDP1 [2].

В певний момент часу, коли електричне поле, збуджене електронним пучком в плазмі, досягає максимального значення, починається деформація профілю концентрації плазми. Області сильного поля мають смугасту структуру, що за формою збігається зі структурою каверн на профілі концентрації. Формування каверн приводить до появи потоків плазмових електронів, спрямованих як в прямому, так і в зворотному напрямку щодо прямого руху електронного пучка. Ці потоки можна також спостерігати на функції розподілу електронів плазми, що на початковій стадії плазмово-пучкової взаємодії була симетричною. На стадії утворення каверн спостерігається також нагрівання електронів фонові плазми на всьому проміжку моделювання: згасання ВЧ поля в кавернах приводить до згладжування (вирівнювання) профілю концентрації плазми, і в результаті електрони плазми в кавернах нагріваються. Також цей ефект може бути пов'язаний із розсіюванням плазмових електронів.

- [1] Ed. B. Grandal. Artificial particle beams in space plasma studies. Plenum Press, N.Y., London, 1985.
- [2] I.O.Anisimov, D.V.Sasyuk, T.V.Siversky. Modified package PDP1 for beam-plasma systems' simulation. // Dynamical System Modelling and Stability Investigation. Thesis of Conference Reports. Kyiv, 2003.



# Два шляхи визначення неперервних перетворень симетрії кінетичної теорії просторово тривимірних коливань плазми

В.Б.Таранов

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Групи Лі симетрії нелінійних рівнянь кінетичних та гідродинамічних моделей теорії плазми потрібні для визначення загальних властивостей цих моделей – законів збереження, можливостей існування точних розв'язків і т. ін.

Гідродинамічні моделі базуються на системах рівнянь у частинних похідних, для них неперервні перетворення симетрії можуть бути одержані за допомогою звичайного алгоритму Лі. Для просторово тривимірних моделей суттєве прискорення цієї роботи забезпечують стандартні програми пакету Maple 14, які дозволяють розглядати системи з досить великою кількістю рівнянь.

Кінетичні моделі базуються на інтегро-диференціальних системах рівнянь Власова-Максвелла, для яких загальні методи визначення симетрії відсутні. Однак існують дві можливості одержання симетрії таким систем:

а) можна визначити симетрії еквівалентної нескінченної системи рівнянь у частинних похідних для моментів функцій розподілу і потім відтворити відповідні симетрії кінетичної теорії (див., наприклад, [1]).

б) можна розглянути граничний випадок холодної плазми, у якому кінетичні моделі теорії базуються на скінченних системах рівнянь у частинних похідних. Вони також можуть бути досліджені навіть у просторово тривимірному випадку за допомогою стандартних програм пакету Maple 14 [2]. Таким шляхом перетворення симетрії просторово одновимірної теорії електронно-позитронної плазми [1] узагальнені на тривимірний випадок у роботі [2].

Крім того, у розглянутих моделях зберігаються можливості розширення симетрії, вивчені у роботі [3].

Можна сподіватися, що певні додаткові результати можуть бути одержані шляхом застосування алгоритмів, пов'язаних із перенормуванням зарядів і мас частинок плазми [4].

1. Taranov V.B., Problems of Atomic Science and Technology, 2007, No. 1, 63.
2. Taranov V.B., 6<sup>th</sup> Int. Conf. 'Electronics and Applied Phys.', 2010, Kyiv, 160.
3. Taranov V.B. SIGMA 4 (2008), 006, 7 pages.  
<http://www.emis.de/journals/SIGMA/2008/006/>
4. Grigoriev Y.N., Ibragimov N.H., Kovalev V.F., Meleshko S.V. Symmetries of integro differential equations, Lecture Notes in Physics, 806, Springer, Dordrecht, 2010.

# Трансформація модових номерів кінетичних альфвенових хвиль у тороїдальній плазмі

*М.Г. Тищенко, Ю.В. Яковенко*

*Інститут ядерних досліджень НАН України*

Робота присвячена дослідженню властивостей кінетичних альфвенових хвиль (КАХ) у тороїдальних термоядерних пристроях – токамаках та стелараторах. КАХ часто спостерігаються в космічній та лабораторній плазмі. Вони виникають у токамаках та стелараторах унаслідок континуумного та випромінювального гамування (continuum and radiative damping) альфвенових нестійкостей. Метою роботи було показати, що відхилення від циліндричної симетрії (зокрема, тороїдальність) приводять до трансформації однієї КАХ в іншу КАХ, яка відрізняється модовим номером.

Ефект, що аналізується в роботі, ґрунтується на “явищі уникнення перетинів” у спектрах (avoided-crossing phenomenon). Якщо гілки дисперсії хвилі, що відповідають різним модовим номерам, перетинаються на фазовій площині, то порушення симетрії, яке зачеплює між собою ці гілки, знищує перетин. Тоді в основному порядку наближення геометричної оптики хвиля повинна переходити з одної гілки на іншу, тобто трансформуватися, при проходженні знищеного перетину. Проте трансформації може завадити тунелювання хвилі через щілину між гілками, що утворилася на місці знищеного перетину. Тому була поставлена задача проаналізувати це тунелювання і знайти відносні амплітуди трансформованої та нетрансформованої хвиль.

Перетворенням Фур'є систему рівнянь восьмого порядку, що описує дві зачеплені гармоніки КАХ, було зведено до системи двох рівнянь першого порядку. Останню, в свою чергу, було зведено до двох рівнянь Шредінгера, до яких було застосовано добре розроблений метод ВКБ. Таким чином було знайдено безрозмірну комбінацію параметрів, у залежності від якої переважає трансформація хвилі або тунелювання.

Отримано аналітичні вирази для амплітуди трансформованої і нетрансформованої хвиль та знайдено залежність коефіцієнта трансформації від ширини щілини. Показано, що трансформація може бути сильною в реальних умовах термоядерних пристроїв (NSTX, ITER). Трансформація підсилюється зі зменшенням аспектного відношення та зі збільшенням відношення радіуса плазми до ларморового радіуса (зокрема, при збільшенні магнітного поля і зниженні температури плазми).

Знайдений ефект може мати практично важливі наслідки, оскільки може вплинути на модовий склад нестійкості, реєстрований зовнішніми магнітними зондами, та на інтенсивність поглинання хвилі плазмою.

Роботу виконано в рамках Проекту УНТЦ № 4588.

## Плазмові технології виготовлення мікостріпових металевих детекторів різного призначення

*О.А. Федорович, В.М. Пугач, Є.Г. Костін, Б.П. Полозов, М.П. Кругленко,  
О.С. Ковальчук, В.М. Міліція, Д.І. Сторожик, А.В. Чаус.*

*ІЯД НАНУ*

За підтримкою Програми CNCP (Проект УНТЦ Р396) було розроблено та виготовлено декілька модифікацій мікостріпових металевих детекторів (ММД) різного призначення.

ММД – це новий тип детекторів для реєстрації заряджених частинок та рентгенівського випромінювання в широкому діапазоні енергій та інтенсивності.

Особливостями ММД є мала товщина детектуючого матеріалу (1-2 мкм), висока радіаційна стійкість (10 – 100 МГу (мегагрей)), висока просторова роздільна здатність 20 – 500 мкм, низька робоча напруга (до 20 В), доступна зчитувальна електроніка. Основною відмінністю наших ММД є пропускання пучка заряджених частинок через детектор без його суттєвого поглинання. В звичайних фольгових детекторах пучок заряджених частинок поглинається кремнієм, який є основою і при значному опроміненні починає проводити струм внаслідок радіаційних пошкоджень окисних плівок ізоляції і самого кремнію. Можна одержувати розподіл пучка в двох координатах (по його поперечному перерізу). Пучки заряджених частинок які проходять через розроблені і виготовлені датчики з допомогою зворотних зв'язків можна фокусувати в необхідні конфігурації.

Враховуючи різні розміри як ширини мікостріпів так і їх довжини в кожному з датчиків доводилось розробляти технологію виготовлення кожного з них.

Одне з основних досягнень – це одержання чистих плівок нікелю з малими напруженнями і високою адгезією відносно підкладки. Про це свідчить відривання нікелевої плівки від кремнієвої підкладки по кремнію. Тобто сила адгезії плівки вища, ніж сила внутрішніх зв'язків в кристалах кремнію. Це забезпечує достатньо високу адгезію закріплення контактних площадок і збільшує надійність мікостріпових металевих детекторів. Напилення при високому вакуумі ( $10^{-5}$  тор) і додатковому розряді в власних парах металу (додаткова іонізація) дозволили одержати чисті нікелеві плівки питомий опір яких не відрізняється від питомого опору чистого нікелю. При використанні магнетронного напилення нікелю, яке проводилось на об'єднанні «Інтеграл» (м. Мінськ), питомий опір нікелевих плівок збільшувався на порядок, а міцність їх була значно меншою, ніж одержано при застосуванні наших технологій напилення.

Виготовлення ММД з вільно висячими в повітрі або в вакуумі стріпами, які кінцями закріплені на кремнієвій підкладці, потребує селективного витравлювання 450 – 500 мкм кремнієвої підкладки, 0,2 мкм  $\text{SiO}_2$  і 0,2 мкм  $\text{Si}_3\text{-N}_4$  і залишенні непошкодженою нікелевої плівки товщиною 1-2 мкм.

В залежності від призначення ММД змінюється як ширина так і довжина стріпів. Це накладає дуже жорсткі умови на селективність плазмохімічного травлення та енергію хімічно активних іонів. Ці проблеми були успішно вирішені. В результаті роботи в 2010 році було розроблено і виготовлено такі мікостріпові металеві детектори: 16 – секторний, 64 – стріповий, 128 – стріповий, 1024 – стріповий. Проведені дослідження ММД на європейському синхротроні ESRF (Гренобль, Франція) на базі медичної лабораторії ID-17 та на синхротроні Diamond Light Source (Великобританія) для досліджень синхротронного випромінювання.

## Дослідження зміни хімічного складу дистильованої води під дією різних типів розрядів атмосферного тиску

*В.В. Юхименко, В.Я. Черняк, С.В. Ольшевський, О.А. Недибалюк, С.М. Сидорук, Ол.В. Соломенко*

*Радиофізичний факультет, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна, Київ 03022, просп. акад. Глушкова, 4г; e-mail: yvitaliy@ukr.net*

## Исследование изменения химического состава дистиллированной воды под действием разных типов разрядов атмосферного давления

*В.В. Юхименко, В.Я. Черняк, С.В. Ольшевский, О.А. Недыбалюк, С.Н. Сидорук, Е.В. Соломенко*

*Радиофизический факультет, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Украина, Киев 03022, просп. акад. Глушкова, 4г; e-mail: yvitaliy@ukr.net*

Исследования плазменной деструкции токсичных веществ, во многих случаях, проводятся в водных растворах. Поэтому нужно знать, как ведет себя, в исследуемых системах, растворитель – дистиллированная вода. В работе представлены результаты исследований поведения дистиллированной воды, при обработке, в плазма–жидкостных системах с разными типами разрядов атмосферного давления. В качестве генераторов плазмы, в таких системах, использовались: вторичный разряд с «жидким» электродом который поддерживался дуговым разрядом; разряд типа «торнадо»; импульсный разряд; разряд в газовом канале с «жидкой» стенкой; разряд в жидкости с ультразвуковым полем. В качестве плазмообразующих газов использовался воздух, пар, аэрозоль (смесь воздуха с обрабатываемой жидкостью).

Исследования показали, что при обработке дистиллированной воды представленными типами разрядов, химический состав жидкости зависит от типа разряда, которым обрабатывается.

В жидкости, после обработки, наблюдается накопление окислителей (ОН, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и др.), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HNO<sub>3</sub> и HNO<sub>2</sub>. Появление тех или иных окислителей зависит от типа разряда, полярности «жидкого» электрода, материала электродов и газов, растворенных в воде.

Продукты эрозии электродов, после попадания в раствор, могут образовывать вещества, которые влияют на протекание химических процессов в растворе.

# Квазістійкі двовимірні векторні солітони в плазмі

*О. І. Якименко<sup>1,2</sup>, О. О. Приходько<sup>2</sup>, С. Й. Вільчинський<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Просторові солітони – локалізовані в просторі хвильові структури, що можуть існувати як результат балансу між лінійним дифракційним розпливанням та нелінійним самофокусуванням. Двовимірні солітони виникають в плазмі в результаті стаціонарного самофокусування потужних лазерних пучків. Якщо б вдалось тривалий час підтримувати значний градієнт поля, що утворюється на границі інтенсивного самоузгодженого хвильового каналу, то це дозволило б створити компактний прискорювач заряджених частинок. Нажаль, у випадку самофокусувального нелінійного середовища двовимірні солітони є нестійкими: вони або розпливаються або колапсують, якщо потужність пучка перевищує деяке порогове значення.

Однією з перспективних ідей, щодо вирішення проблеми стабілізації, є використовувати хвильовий пучок малої інтенсивності для призупинення колапсу більш потужного пучка. При цьому взаємодія між пучками повинна бути дефокусувальною, що зумовлено резонансним характером взаємодії між лазерними пучками від різниці частот: якщо різниця частот наближається до плазмової електронної частоти, знак нелінійної кросс-взаємодії міняє знак. Раніше було зроблене передбачення стабілізації колапсу потужного надкритичного лазерного та існування стійкої пари векторних солітонів на основі спрощеної аксіально-симетричної моделі. Нами досліджено можливість стабілізації векторної пари солітонів на основі більш загальної моделі, що базується на системі (2+1)-вимірних нелінійних рівнянь Шрьодінгера з самофокусувальною не лінійністю в кожній компоненті та кросс-дефокусувальною нелінійністю між компонентами.

Структури, що дають найбільше надій на стійке поширення - це хвильові пакети, в яких надкритична ( $N > N_{th}$ ) кільцева компонента утворює пастку для світлої неколапсувальної компоненти з меншою інтенсивністю  $N < N_{th}$ . Для стабілізації потрібно збільшити інтенсивність і ширину ефективної потенціальної ями, щоб запобігти розширенню внутрішньої компоненти. Але, нажаль, вище певного порогу, початкове кільце розпадається на два фрагменти, які рухаються від центру і колапсують. Таким чином, нами було встановлено принципове обмеження, що не дозволяють досягти повної стабілізації векторних солітонів.