

## Тези доповідей з фізики плазми

### ХОЛЛІВСЬКИЙ МЕХАНІЗМ ГЕНЕРАЦІЇ ОБЕРТАННЯ ПЛАЗМИ В ПЛАЗМІ z-ПІНЧА

А. А. Гурін

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

На основі дворідинного розширення МГД теорії, що враховує ефект Холла, розвинуто теорію гвинтових коливань циліндричного z-пінча з довільними розподілами компонент магнітного поля,  $B_\theta(r)$  та  $B_z(r)$ , й течії плазми,  $V_\theta(r)$  та  $V_z(r)$ , які задовольняють умові рівноваги плазми, створюваної й підтримуваної довільним струмом. В наближенні холодної ідеальної плазми, яке дає можливість розглянути ефекти надтеплого обертання плазми, одержано рівняння другого порядку для величини електронного зміщення, яке узагальнює класичну крайову задачу Хайна - Люста [1] без обертання, та [2] – з обертанням стандартної МГД теорії. З метою визначення радіальних розподілів  $V_\theta(r)$ ,  $V_z(r)$  досліджено рівняння азимутальної й повздожньої рівноваги плазми, усередненні по коливанням усіх МГД величин, обчислюючи квадратичні по амплітудам складові, нехтуючи радіальним переносом та зіткненнями в плазмі. Показано, що в цьому наближенні саме врахування холлівських ефектів робить умови нерадіальної рівноваги змістовними, й дозволяє визначити середні величини гідродинамічних швидкостей в межах кожної магнітної поверхні через співвідношення величин  $\langle \delta B_r(r) \delta B_{\theta,z}(r) \rangle$  та  $\langle \delta V_r(r) \delta V_{\theta,z}(r) \rangle$ . Обчислення зроблені на прикладі кінків пінча з малим запасом стійкості,  $q \ll 1$ , й не занадто високих значень холлівського параметра  $\Pi = (\omega_{ci}/\omega_A)^2 = 40 \div 50$ , характерних для сучасних пінчів з оберненим полем в “квазіодномодовому” стані коливань. Методом стрільби визначено нестійкі кінк-моди в нерухомій плазмі, які для даних величини  $\Pi$  характеризуються низькими в альфвенівській шкалі частотами. Рівняння балансу сил дають основу для визначення швидкості течії плазми, за умови якої стабілізується обертання плазми. Досліджено особливості локалізації швидкості течії плазми для резонансних “внутрішніх” мод. Запропоновано квазілінійну холлівську ідеальну МГД модель, яка ілюструє “spin-up” процес та стабілізацію плазми її власним, генерованим коливаннями обертанням, через вплив радіальних розподілів  $V_\theta(r)$ ,  $V_z(r)$  на дисперсію глобальних мод.

1. Hain K., Lust R. // Z. Naturforsch. - 1958. - Vol. 13a. - P. 936.
2. Wang C., Blockland J.W.S., Keppens R.K., Goedbloed J.P. // J Plasma Phys. - 2004. - Vol. 70. - P. 651.

## **ПОГЛИНАННЯ ВЧ-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В ГЕЛІКОНОВОМУ ПЛАЗМОВОМУ ДЖЕРЕЛІ ІОНІВ В УМОВАХ НИЖНЄГІБРИДНОГО РЕЗОНАНСУ**

**О. В. Алексенко, В. І. Мирошніченко, С. Н. Мордик**

*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми*

Проведені чисельні оцінки оптимального поглинання потужності ВЧ – електромагнітного поля в приосевій області розрядної камери геліконового джерела для певних геометричних розмірів розрядної камери та збуджуючої антени, типу збудженої моди, тиску робочого газу. Зроблено оцінку інтегральної поглинальної потужності, просторового розподілу поглинання потужності при резонансі, максимально можливого іонного струму. Для розрахунків обрано параметри джерела іонів, що використовується як інжектор ядерного мікрозонду ПДФ НАН України.

Вважається, що циліндричне джерело плазми знаходиться в зовнішньому поздовжньому однорідному магнітному полі. Збудження електромагнітних хвиль у джерелі відбувається поперек зовнішнього магнітного поля. Робоча частота  $\omega$  збуджуючої антени дорівнює  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  (*рад/сек*),  $f = 27,12 \text{ МГц}$ , та задовольняє діапазону  $\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce} < \omega_{pe}$ , при цьому  $\omega < \omega_{LH}$ .

## **МЕХАНІЗМ ПРИСКОРЕННЯ ГЕЛІКОННОЇ ПЛАЗМИ ПОНДЕРОМОТОРНИМИ СИЛАМИ, ЩО ГЕНЕРУЮТЬСЯ ПОЛЯМИ ГІБРИДНИХ МОД**

**М. А. Бєлошенко<sup>1</sup>, К. П. Шамрай<sup>1</sup>, Ш. Шінохара<sup>2</sup>**

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

*<sup>2</sup>Токійський університет сільського господарства і технологій, Токіо, Японія*

Запропоновано і теоретично проаналізовано новий механізм прискорення геліконної плазми, основою якого є пондеромоторні сили, що продукуються полями специфічних гібридних мод неоднорідного плазмового циліндру. Ці моди сформовані зв'язаними геліконними і квазіпотенціальними (Трайвеллпс-Гулдівськими, ТГ) хвилями і, на відміну від звичайних геліконних мод з приосевою локалізацією, локалізовані в периферійній області плазмового стовпа, між його краєм і поверхнею взаємної трансформації геліконів і ТГ хвиль. Найнижчі радіальні гібридні моди слабо загасають і можуть поширюватись вздовж плазмового стовпа, формуючи дальнє поле антени. Такі найнижчі моди мають сильні ВЧ поля, значно більші за поля звичайних геліконних мод, завдяки присутності потенціальної складової та ефекту поляризації не-

однорідної плазми. При достатньо високих амплітудах полів генеровані ними пондеромоторні сили здатні прискорювати плазму в напрямку поширення моди завдяки двом ефектам. Перший з них зобов'язаний прямій дії поздовжньої компоненти пондеромоторної сили. Інший ефект виникає в певному діапазоні параметрів завдяки компресії плазмового стовпа поперечною складовою пондеромоторної сили, наслідком чого в розбіжному магнітному полі є прискорення плазми в поздовжньому напрямку. Ефекти прискорення були проаналізовані для геометричних і фізичних параметрів, придатних для розробки плазмового двигуна з тягою в мН діапазоні.

## **ГАЗОДИНАМІЧНЕ І ХІМІЧНЕ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ НЕІЗОТЕРМІЧНОСТІ ПЛАЗМИ ПОПЕРЕЧНОЇ ДУГИ**

**В. Я. Черняк, І. В. Присяжнєвич, В. В. Юхименко,  
О. А. Недибалюк, Є. В. Мартиш, Т. Є. Лиситченко**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
радіофізичний факультет, Київ*

Виходячи з енерговитратності процесу конверсії вуглеводневих палив найбільш прийнятним напрямком можна вважати підтримуване плазмою часткове окислення палив. Але при цьому не можна виключати процеси не тільки ендотермічні, але й екзотермічні, пов'язані з стимулюванням плазмою повного спалення частини палива. Питання реального впливу енерговиділення при хімічних процесах на рівень нерівноважності плазми практично не досліджене, хоча й піднімалось Л.С. Полаком вже в перших роботах з нерівноважної плазмохімії [1]. Без відповіді на дане питання сьогодні не можна будувати ефективні великомасштабні плазмові технології риформінгу вуглеводневих палив в синтез-газ.

В дослідженнях даного напрямку були використані газові розряди атмосферного тиску з найвищим на сьогодні рівнем нерівноважності плазми, а саме: електрична дуга, що обдувається поперечним потоком газу (повітря, суміш повітря + етанол) і електричний розряд в повітряному каналі з рідкою паливною стінкою.

Виявлено ефективні механізми керування рівнем нерівноважності плазми електричних розрядів: зменшення рівня за рахунок стимульованого плазмою багатоканального екзотермічного процесу повного окислення етилового спирту в умовах сильно збідненої паливної суміші (етиловий спирт / повітря  $\sim 1/33$ ), коли спирт є незначною домішкою до вихідного плазмоутворюючого газу, і збільшення рівня за рахунок поперечного газового обдуву плазмового стовпа.

Так експериментальні дослідження плазми поперечного дугового розряду показали, що введення додаткової енергії за рахунок спалення в розряд приводить тільки до підвищення кінетичної температури і температури заселен-

ня обертальних рівнів при відносному внеску в розряд енергії від спалення  $\geq 10\%$ . У межах похибок вимірювань температур заселення внутрішніх станів нейтральних частинок плазми ніякого впливу на температури заселення кovalьних і електронних рівнів при цьому не помічено.

Для плазмово-рідинної системи з розрядом в повітряному каналі з рідкою паливною стінкою виявлено, що в плазмі швидкість процесів реформування палива в синтез-газ та легкі вуглеводні суттєво перевищує швидкість спалення, що забезпечує високу ефективність реформування в плазмі такого розряду на рівні комплексних систем (плазма + високотемпературний піроліз). У той же час при наявності палива в рідині плазма стає ізотермічною за рахунок додаткового підведення хімічної енергії до важкої компоненти плазми за рахунок повного спалення частини палива і переважного збільшення саме газокінетичної температури нейтральної компоненти.

Робота була зроблена за часткової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Національної академії наук України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

1. *Полак Л.С.* Плазмохимическая кинетика // Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1971. - С. 302 - 387.

## **АЛЬФВЕНІВ КОНТИНУУМ ТА КОНТИНУУМ ГЕОДЕЗИЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИ У ТОКАМАКАХ З ВИСОКИМ ТИСКОМ ПЛАЗМИ**

**О. П. Фесенюк, Я. І. Колесниченко, Ю. В. Яковенко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Встановлено, що властивості спектру альфвенових коливань у токамаках дорічно змінюються при підвищенні тиску плазми та коефіцієнту безпеки токамаку. Зокрема, показано, що загальноживані вирази для частоти геодезичної акустичної моди та характерних частот щільні континууму є справедливими лише при дуже малому тиску плазми. Отримано узагальнені вирази для цих частот. Знайдено, що альфвенів континуум у центральній області плазми токамаків з порожнистим профілем струму та сферичних торів з великим тиском плазми описується рівнянням  $\text{Mat}^2 \epsilon$ . З нього випливає, що у цих випадках названі частоти збираються в групи, в кожній з яких вони майже збігаються, внаслідок чого майже весь розглянутий частотний діапазон являє собою щільну континуумі.

Названі результати стосовно токамаку з круглим перерізом плазми опубліковано в [1] та було використано у доповіді на запрошення в [2]. Останнім часом здійснено узагальнення цих результатів на випадок токамака з некруглим перерізом, про що дає уявлення таблиця.

Позначення:  $\epsilon_{g2} = (\kappa^2 - 1)/(\kappa^2 + 1)$ ,  $\check{\beta} \equiv 2\bar{\beta}/(\kappa^2 + 1)$ ,  $\bar{\beta} \equiv 2\beta_s/[(1 + \beta_s)]$ ,  $\beta_s = c_s^2/v_A^2$ ,  $\mathcal{D}_{GAM} \equiv 1/q^4 + \check{\beta}\epsilon_{g2}(1 + \epsilon_{g2})/q^2 + \check{\beta}^2(1 + \epsilon_{g2})^2/2$ ,  $\mathcal{D}_{TAE} \equiv 2\mathcal{D}_{GAM} - (1 - 3\epsilon_{g2}^2/4)/q^4$ .

$\omega_{GAM}$	$\left\{ \frac{2+1/q^2}{1-\epsilon_{g2}^2/2} \left[ \check{\beta} \left( 1 + \frac{\epsilon_{g2}}{2} \right) + \frac{1}{q^2} - \sqrt{\mathcal{D}_{GAM}} \right] \right\}^{1/2}$
$\omega_{TAE}$	$\left\{ \frac{1}{1-\epsilon_{g2}^2/4} \left[ 2\check{\beta} \left( 1 + \frac{\epsilon_{g2}}{4} \right) + \frac{5}{4q^2} \left( 1 + \frac{3}{20}\epsilon_{g2} \right) - \sqrt{\mathcal{D}_{TAE}} \right] \right\}^{1/2}$
$\omega_{EAE}^{lower/upper}$	$\left[ \frac{(1 \pm \epsilon_{g2}/2)/q^2 \pm \check{\beta}(1 + \epsilon_{g2})}{1 \mp \epsilon_{g2}/2} - 2\check{\beta} \right]^{1/2}$

1. *Fesenyuk O.P., Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V.* Plasma Phys. Control. Fusion. – 2012. – Vol. 54. –P. 085014.
2. *Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V., Fesenyuk O.P.* Invited talk I-06 // Int. Conf.-School on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (Alushta-2012): Book of Abstracts. - Alushta, 2012. - P. 8.

## ДВОЩІЛІННИЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ВТРАТ ШВИДКИХ ІОНІВ У ТОКАМАКАХ-РЕАКТОРАХ

**В. Я. Голобородько<sup>1</sup>, В. Кіптілий<sup>2</sup>, Ф. Сесіл<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup> Калемський науковий центр з керованого синтезу, Калем, Великобританія

<sup>3</sup> Школа шахт, Колорадо, США

На багатьох існуючих токамаках (JET (Англія), ASDEX (Німеччина) та ін.) встановлені та ефективно працюють детектори втрачаємих швидких іонів. Серед них слід відзначити сциляційні детектори, що дають інформацію про енергетичні та пітч-кутові розподіли швидких іонів, та Фарадеївські детектори, що дають інформацію про енергетичні спектри втрачаємих іонів. Зважаючи на важливість інформації про утримання швидких іонів в токамаці-реакторі ІТЕР, що споруджується міжнародною спільнотою у м. Кадараш (Франція), постає нагальна необхідність розробки відповідних детекторів швидких іонів для цієї установки. Існуючі детектори не зможуть працювати в умовах плазмового розряду на токамаці ІТЕР, де очікуються потоки швидких іонів та нейтронів на порядок вищі за рекордні величини найкрупнішого на сьогодні токамака-реактора JET (Англія). В даній доповіді представлено проект модернізації одного з встановлених на токамаці JET Фарадеївських детекторів та перетворення його у двощілінний спектрометр швидких іонів. Представлено також розроблений в ІЯД НАНУ числовий пакет для оптимізації геометрії запропонованого детектора. Показано, що такий детектор може мати задовільну роздільну здатність як по енергіях швидких іонів, так і по їх пітч-кутах. При цьому, такий детектор зможе працювати в жорстких умовах токамака-реактора ІТЕР. Для тестування нового детектора, планується його встановлення на діючому токамаці-реакторі JET у 2013 р.

## ФОКУСУВАННЯ ПУЧКІВ ВІД'ЄМНО ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОЮ ПЛАЗМОВОЮ ЛІНЗОЮ ПРОСТОРОВОГО ЗАРЯДУ

А. Гончаров<sup>1</sup>, А. Добровольський<sup>1</sup>, І. Літовко<sup>2</sup>, В. Гушенец<sup>3</sup>, Е. Окс<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут фізики НАН України, Київ

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

<sup>3</sup> Інститут сильнотривової електроніки СВ РАН, Томськ, Росія

У представлений роботі було побудовано та апробовано фізичну та математичну моделі процесів, що сприяють накопиченню іонної хмари просторового заряду в об'ємі лінзи та впливають на процеси фокусування пучків, що проходять крізь неї. Розроблено чисельну модель процесу створення динамічної хмари об'ємного заряду у електростатичній плазмовій лінзі та фокусування пучків частинок з від'ємним знаком заряду хмарою просторового заряду, що дозволяє розраховувати процес накопичення просторового заряду у плазмовій лінзі та взаємодію створеної хмари просторового заряду з пучком заряджених часток, що проходить крізь апертуру лінзи з урахуванням процесу постійного надходження нових додатних іонів до хмари. Тестові розрахунки показують відповідність одержаних на основі моделі результатів з відомими з літератури, а також з одержаними в експерименті; Отримані результати добре узгоджуються з експериментом.

Чисельний експеримент підтвердив важливість врахування магнітного поля в об'ємі лінзи і критичність його величини для розділення електростатичного та магнітного фокусування та показав важливість дотримання правильного співвідношення між об'ємними зарядами лінзи та пучка, що фокусується. У випадку перевищення об'ємним зарядом пучка такого в лінзі, фокусуєчий режим роботи плазмової лінзи порушується.

Проведено дослідження електростатичних характеристик зразка плазмової лінзи, а також фокусування пучка електронів як малих, так і великих струмів електростатичною плазмовою лінзою. Було встановлено: що плазма хмари об'ємного заряду стабілізує роботу джерела електронів та разом з фокусуєчими можливостями лінзи дозволяє стиснути 100 амперний, широко апертурний (початковий діаметр 6 см) пучок до розміру 1 см. та отримати густину струму пучка більшу за 100 А/см<sup>2</sup>. Експериментально показано можливість побудови плазмової лінзи з динамічним просторовим зарядом, що не має провалу плаваючого потенціалу на вісі лінзи, обумовленого закруткою іонів хмари у магнітному полі лінзи.

## **ЕНЕРГІЯ СПОРІДНЕНОСТІ ТРИПЛЕТНОГО СТАНУ НЕГАТИВНОГО ІОНУ АТОМАРНОГО ВОДНЮ У МЕТОДІ ГІПЕРСФЕРИЧНИХ КООРДИНАТ**

**І. І. Гайсак<sup>1</sup>, М. І. Гайсак<sup>1,2</sup>, М. М. Пішта<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Ужгородський національний університет, Ужгород*

<sup>2</sup> *Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород*

Наведені результати досліджень енергії спорідненості негативного іону атомарного водню у триплетному стані у рамках адиабатичного підходу методу гіперсферичних координат (ГСК) в одновимірному просторі. Відомо, що для тричастинкових атомних систем важливим є внесок кореляційного руху електронів, який тісно пов'язаний із симетрійними властивостями хвильової функції системи. Наприклад, для атому гелію гамільтоніан системи відрізняється від негативного іону атому водню лише зарядом та масою ядра. Існують зв'язані як синглетні, так і триплетні квантові стани. Наявність триплетного стану у негативного іону атому водню не встановлено, навіть існує точка зору Гіллерасса [1], що його ймовірно зовсім не існує у природі. Однак існування такого стану має важливе значення для фізики та астрономії [2].

Розрахунки, проведені у даній роботі та у попередніх публікаціях [3, 4], показують, що енергія спорідненості для триплетного стану негативного іону атомарного водню приблизно у чотири рази менша за відповідну величину енергії для синглетного стану, яка добре узгоджується із експериментальними даними ( $\sim 0.75$  еВ).

1. *Hylleraas E.A.* // *ApJr.* - 1964. - Vol. 9, No. 32. - P. 345.
2. *Rau A.R.P.* // *J. Astrophys. Astr.* - 1996. - Vol. 17. - P. 113.
3. *Гайсак М., Чундак М.* // *Вісник УжНУ. Серія Фізика.* - 2009. - Т. 24. - С. 57.
4. *Гайсак І., Гайсак М., Ламер І.* // *Вісник УжНУ. Серія Фізика.* - Т. 30. - С. 195.

## **ПЛАЗМОВО-РІДИННА СИСТЕМА З ІМПУЛЬСНИМ РОЗРЯДОМ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТА ФОКУСУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ**

**В. В. Юхименко<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>, Є. В. Мартиш<sup>1</sup>, О. А. Федорович<sup>2</sup>,  
О. А. Недибалюк<sup>1</sup>, Є. Ю. Гаврилюк<sup>1</sup>, Т. Є. Лиситченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
радіофізичний факультет, Київ*

<sup>2</sup> *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Плазма в хімії розглядається як хімічно активне середовище, хімічна активність якого забезпечується великою кількістю активних частинок: іонів,

електронів, радикалів, збуджених частинок та інш. Ціною такої високої активності плазми є низька селективність плазмово-хімічних перетворень. Необхідність підвищення селективності зараз є дуже актуальною, це пов'язано з переходом від хімічної промисловості до "зеленої хімії": виключення шкідливих відходів і використання нетоксичних і шкідливих речовин.

Для зеленої хімії є перспективними процеси в надкритичних флюїдах (води, вуглекислого газу). Вода в надкритичних умовах необмежено змішується з киснем, воднем і вуглеводнями, полегшуючи їх взаємодію один з одним. Наприклад, в надкритичній воді значно збільшується швидкість окислення, така вода може бути використана не тільки для ефективного знищення небезпечних хімічних речовин, а також для гідролізу, гідратації, створення або руйнування зв'язків вуглець-вуглець, і так далі. Отримати такі надкритичні умови в рідинах можна в плазмово-рідинних системах з імпульсним розрядом. Використання імпульсного електричного розряду в рідині зумовлює появу нових чинників: сильне ультрафіолетове випромінювання, акустичні або навіть ударні хвилі. Крім того, акустичні коливання в таких системах можуть бути використані в якості додаткового механізму впливу на хімічні перетворення.

Можливо, найбільш перспективним методом використання акустичних хвиль є їх генерація за допомогою осевого імпульсного електричного розряду із наступним відбиттям від ідеальної циліндричної поверхні, що може забезпечити кращу симетрію стиснення збіжної акустичної хвилі, як в газі так і в рідині. Дослідженням такого підходу присвячена дана робота.

В роботі використовувався плазмово-хімічний реактор циліндричної геометрії з осевим імпульсним розрядом створеного за умови, щоб характерний радіус плазмового каналу -  $r$  був набагато меншим, ніж радіус циліндричного реактору  $R$ . Радіус циліндра набагато більший, ніж висота циліндра -  $H$ :  $R/H = 13,5$ .

Досліджено різні параметри системи: виміряні осцилограми струму та напруги, а також осцилограми оптичного випромінювання розряду. Використовувались різні робочі рідини: дистиллят, етанол та інш. Реалізувались режими роботи системи з одиночними імпульсами, подвійними імпульсами та серіями імпульсів різної частоти. Досліджено збіжні та розбіжні акустичні хвилі, що утворювались розрядом. Виміряні швидкості розповсюдження акустичних хвиль. Проведено вимірювання залежностей амплітуд акустичних сигналів від енергії, що вкладалась в розряд. Досліджено виділення тепла в системі залежно від вкладеної енергії в розряд. Виміряно та досліджено радіальний розподіл амплітуди акустичного сигналу. Досліджено реформування пального в такій системі.

Ця робота була зроблена за часткової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Національної академії наук України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка.



## ДЕСТАБІЛІЗАЦІЯ ГЕОДЕЗИЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИ ЕНЕРГІЙНИМИ ІОНАМИ У ПЛАЗМІ ТОКАМАКІВ З ВИСОКИМ ТИСКОМ

**Я. І. Колесниченко, Б. С. Лепявко, В. В. Луценко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Нестійкості плазми, пов'язані зі збудженням  $n = 0$ -моди ( $n$  - тороїдальне хвильове число) - так званої «геодезичної акустичної моди» (ГАМ) - енергійними іонами, спостерігалися як на токамаках, так і на стелараторах. Зокрема, на токамаці JET нестійкість виникла внаслідок прискорення іонів при іонному циклотронному нагріванні плазми [1]. У токамаці DIII-D нестійкість збуджувалася при інжекції пучків енергійних нейтральних атомів, причому частота коливань була значно меншою від ГАМ-частоти [2]. Пояснення цьому факту було дано в [3], де було показано, що зміна частоти в DIII-D відбувалася за рахунок внеску енергійних іонів у дисперсійне рівняння, тобто спостерігалася «ГАМ-мода енергійних частинок», ЕГАМ. У названих експериментах параметр  $\beta$  ( $\beta$  - відношення тиску плазми до тиск магнітного поля) був дуже низьким, приблизно 0.4 %, у центрі плазми. Питання про ГАМ-нестійкість у плазмі з більш високим  $\beta$ , тобто у плазмі, яка являє інтерес для термоядерної проблеми, до цього часу не вивчалася. З іншого боку, як показано у нещодавній публікації [4], властивості ГАМ-континуума, а також альфвенового континуума, значно змінюються при збільшення добутку  $\beta q^2$  ( $q$  - коефіцієнт безпеки токамака). Це стимулювало виконання даної роботи, де розглянуто дестабілізацію ГАМ-моди у плазмі з високим тиском ( $\beta q^2 \leq 1$ ) пролітними енергійними іонами. Розглянуто як випадок відносно малого тиску енергійних іонів, коли  $\beta_h \ll \beta$  ( $\beta_h$  - відношення тиску енергійних іонів до тиску магнітного поля), так і випадок з  $\beta_h \sim \beta$ . У першому випадку аналіз проведено аналітично за допомогою методу теорії збурень. Вивчення другого випадку, тобто ЕГАМ нестійкості, проведено числовим методом.

1. *Boswell C.J. et al. // Phys. Lett. A. – 2006. - Vol. 358. – P. 154 - 158.*
2. *Nazikian R. et al. // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 101. - P. 185001.*
3. *Berk H.L., Zhou T. // Nucl. Fusion. – 2010. – Vol. 50. - P. 035007.*
4. *Fesenyuk O.P., Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2012. – Vol. 54. - P. 085014.*

## ГЕОДЕЗИЧНА АКУСТИЧНА МОДА У ТОКАМАКАХ З ВИСОКИМ ТИСКОМ ПЛАЗМИ

**Я. І. Колесниченко, В. В. Луценко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Геодезична акустична мода (ГАМ) - низькочастотні звукоподібні коливання у тороїдній плазмі, які є симетричними відносно головної осі тору (тороїдальне хвильове число  $n = 0$ ) [1]. При таких коливаннях звичайна причина збудження низькочастотних нестійкостей – просторова неоднорідність розподілу частинок, а точніше, залежність функції розподілу частинок ( $F$ ) від їх канонічного кутового моменту ( $P_\phi$ ) – не впливає на стійкість, тому ГАМ збуджується або енергійними іонами з інверсним енергетичним розподілом [ $\partial F(\varepsilon, \mu, P_\phi) / \partial \varepsilon > 0$ , де  $\varepsilon$  та  $\mu$  - енергія та магнітний момент частинок, відповідно] або мікротурбулентністю плазми. Слід відзначити, що у переважній більшості публікацій використано локальне наближення, що дає лише континуумну частоту. Крім того, переважна більшість робіт стосується плазми з дуже низьким  $\beta$  ( $\beta$  - відношення тиску плазми до тиску магнітного поля). Між тим, як показано в [2], властивості ГАМ-континуума, а також альфвенового континуума, докорінно змінюються у плазмі з великим тиском. Це поставило на порядок денний питання про власні ГАМ-коливання та збудження цих коливань у плазмі великим тиском. Перше з них розглянуто у цій роботі, а друге – в [3].

У цій роботі виведено рівняння, що описують ГАМ-коливання у плазмі з енергійними іонами. Показано, що  $\beta$ -зачеплення домінуючої Фур'є гармоніки  $\Phi_{0,0}$  з гармонікою  $\Phi_{2,0}$  [ $\Phi_{m,n}$  -  $(m, n)$ -гармоніка скалярного потенціалу електромагнітних збурень,  $m$  - пологідальне хвильове число] дозволяє вирішити питання про існування власних та вимушених ГАМ-мод у тороїдній плазмі. Тим самим вказано на можливий механізм формування радіальної структури цих мод (відмінний від запропонованого у [4]). Створено числовий код, який розв'язує виведені рівняння. Код спрямований на пошук власних частот та визначення радіальної структури  $\Phi_{0,0}$ ,  $\Phi_{2,0}$ , а також величин, що характеризують стисність плазми. Проведено конкретні розрахунки й знайдено власні ГАМ-коливання у токамаках з оберненим широм магнітного поля. Показано, що навіть при монотонному профілі коефіцієнту безпеки токамаку  $[q(r)]$  ГАМ-континуум може мати екстремум, а отже, є можливими власні ГАМ-коливання; це може пояснити експериментальні спостереження на JET. Знайдено, що інжекція енергійних іонів у напрямку струму у плазмі має стабілізуючий ефект, тоді як інжекція проти струму є дестабілізуючою, що узгоджується з експериментом.

1. Winsor N., Johnson J.L., Dawson J.M. // Phys. Fluids. - 1968. - Vol. 11. - P. 2448.
2. Fesenyuk O.P., Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V. // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2012. - Vol. 54. - P. 085014; also, at this Conference (Fesenyuk's presentation).
3. Колесниченко Я.І., Лепякко Б.С., Луценко В.В. Доповідь на цій конференції.
4. Fu G.Y. // Phys. Rev. Lett. - 2008. - Vol. 101. - P. 185002.

## ЧИ ПОВ'ЯЗАНІ КОЛАПСИ ПИЛЧАСТИХ КОЛИВАНЬ У ТОКАМАКАХ ЗІ СТОХАСТИЗАЦІЄЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ?

**Я. І. Колесниченко, Ю. В. Яковенко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Пилчасті коливання, що проявляються як чергування швидких теплових колапсів у центральній частині плазми з інтервалами повільного нагрівання плазми, є однією з найпоширеніших форм МГД-активності плазми в токамаках. Окрім того, що вони помітним чином впливають на утримання плазми, вони можуть бути спусковим гачком для інших небезпечних нестійкостей. Незважаючи на давність відкриття цього явища, важливі аспекти його природи досі залишаються загадкою. Найвідоміша модель пилчастих коливань - модель Кадомцева [1] - пояснює колапс перезамкненням магнітних поверхонь. Однак пізніші спостереження виявили низку фактів, які свідчать, що перезамкнення гвинтового магнітного потоку під час колапсу, всупереч цій моделі, є неповним. У кількох роботах було зроблено спроби пояснити це або наявністю другого перезамкнення, яке частково ліквідує наслідки першого [2], або тим, що перезамкнення є неповним, а власне колапс викликається стохастизацією силових ліній [3, 4] або турбулентністю якоїсь природи (напр., [5, 6]). Наразі з'ясування механізму колапсу залишається важливою задачею.

Ця робота присвячена аналізу можливості того, що колапс викликається стохастизацією силових ліній (цей варіант останнім часом набув популярності). Проведено теоретичний аналіз стохастизації магнітних силових ліній при перекритті вторинних резонансів, а також числове моделювання. Показано, що стохастизація не здатна істотно вплинути на перенесення енергії, якщо коефіцієнт безпеки на осі перевищує 0.8 (це відзначалось і в самих роботах [3, 4]). Механізм стохастичної дифузії, що розглядається в роботі [3], є надто повільним, щоб пояснити колапс, а стохастизація магнітного поля в роботі [4] є, схоже, наслідком похибки обчислень.

1. Кадомцев Б.Б. // Физика плазмы. - 1975. - Т. 1. - С. 710.
2. Kolesnichenko Ya.I. et al. // Phys. Rev. Lett. - 1992. - Vol. 68. - P. 3881.
3. Lichtenberg A.J. // Nucl. Fusion. - 1984. - Vol. 24. - P. 1277.

## **АЗИМУТОНИ В ЧАСТКОВО ІОНІЗОВАНІЙ ПЛАЗМІ З ТЕПЛОВОЮ НЕЛІНІЙНІСТЮ**

**В. М. Лашкін**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Чисельно знайдені нові нелінійні розв'язки системи рівнянь, описуючих частково іонізовану плазму з зіткненнями та нелокальною тепловою нелінійністю. Знайдені розв'язки являють собою нові нелінійні структури з складною просторовою модуляцією фази - азимутони. Вони несуть ненульовий кутовий момент та характеризуються чотирма параметрами: нелінійним зсувом частоти (або амплітудою)  $\mu$ , кутовою частотою обертання  $\omega$ , топологічним зарядом  $m_{tot}$  та числом піків  $N$ . В певному діапазоні параметрів азимутони виявляються стійкими та еволюціонують без зміни форми багато десятків періодів обертання.

## **ПРИГНІЧЕННЯ АЛЬФВЕНОВИХ КАСКАДІВ ПРИ НАГРІВАННІ НА ЕЛЕКТРОННОМУ ЦИКЛОТРОННОМУ РЕЗОНАНСІ**

**В. С. Марченко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Горизонтальна поляризація плазми при нагріванні на електронному циклотронному резонансі спричиняє потужне гамування тепловими іонами так званих альфвенових каскадів – мод дискретного спектру, які локалізовані в області мінімуму коефіцієнта безпеки в розрядах з немонотонним профілем струму. Якщо темп квазілінійної дифузії електронів у просторі швидкостей, спричиненої циклотронними хвилями, становить величину порядку частоти зіткнень електронів з іонами, то декремент гамування, нормований на частоту моди, може сягати десятків відсотків. Цей механізм може бути відповідальним за пригнічення альфвенових каскадів на токамаку DIII-D, коли профіль циклотронного нагрівання збігався з мінімумом коефіцієнта безпеки.

1. Van Zeeland M.A. et al. // Plasma Phys. Cont. Fusion. - 2008. - Vol. 50. - P. 035009.

## ПЛАЗМОВИЙ КАТАЛІЗ КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У ПОТОЦІ ПОВІТРЯ/CO<sub>2</sub>

**О. А. Недибалюк<sup>1</sup>, О. В. Соломенко<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>,  
Д. Л. Чернолуцький<sup>1</sup>, Є. В. Мартиш<sup>1</sup>, Т. Є. Лиситченко<sup>1</sup>,  
Л. В. Симончик<sup>2</sup>, В. І. Архипенко<sup>2</sup>, А. А. Кириллов<sup>2</sup>, А. І. Ліптуга<sup>3</sup>,  
С. В. Драгнєв<sup>4</sup>, Д. С. Левко<sup>5</sup>, О. М. Цимбалюк<sup>6</sup>**

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

<sup>2</sup> Інститут фізики ім. Б. І. Степанова, Мінськ, Білорусія

<sup>3</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова, Київ

<sup>4</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

<sup>5</sup> Університет Поля Сабатьє, Тулуза, Франція

<sup>6</sup> Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, Луганськ

Значна частина енергії, яка споживається в наш час, видобувається з викопних видів палива. Саме тому, за рахунок виснаження традиційних видів викопного палива, сьогодні зростає інтерес до зеленої енергетики, тобто ефективного використання відновлюваних джерел енергії (наприклад біоетанол, біодизель). Біоетанол та біодизель можна отримати з відновлюваної біомаси. Однак, біоетанол потребує додаткової активації горіння, а для сучасних технологій виготовлення біодизелю, характерним є великий відсоток відходів (біогліцерол) ~10 %.

У даній роботі досліджувалось реформування вуглеводнів у плазмово-рідинній системі зі зворотно вихровим потоком газу типу “торнадо” з рідким електродом (“ТОРНАДО-РЕ”). Робочим газом була суміш повітря з CO<sub>2</sub>. В якості модельних вуглеводнів було використано біоетанол та біогліцерол. Дана плазмово-рідинна система складається з області де генерується плазма та реакційної (піролітичної) камери в яку інжектуються активні частинки.

Досліджено вольт-амперні характеристики розряду за різних робочих газів та рідини, а також залежність пульсацій струму від напруги розряду. Плазма досліджувалась за допомогою методу емісійної спектроскопії. За емісійними спектрами визначені відносні концентрації та температури заселення електронних T<sub>e</sub>\* коливальних T<sub>v</sub>\* та обертальних T<sub>r</sub>\* рівнів компонент плазми. Для дослідження газових продуктів на виході із системи використовувались методи газової хроматографії, мас-спектроскопії та інфрачервоної спектрофотометрії. За допомогою цих методів було визначено які компоненти і в якому співвідношенні присутні у газі на виході із плазмово-рідинної системи. Проведено порівняння експериментальних даних та результатів числового моделювання основних компонент газової суміші на виході із системи у випадку робочої рідини – біоетанолу.

Ця робота була зроблена за часткової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Національної академії наук України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

## ПЛАЗМОВА СИСТЕМА З ОБЕРТАЛЬНОЮ КОВЗНОЮ ДУГОЮ З ТВЕРДИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

**О. А. Недибалюк, О. В. Соломенко, В. Я. Черняк, Є. В. Мартиш,  
І. І. Федірчик, Т. Є. Лиситченко**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Важливою задачею для плазмових технологій є створення та дослідження плазмових систем, які б працювали за високих тисків, генерували нерівноважну плазму та мали великий ресурс роботи.

У даній роботі досліджено динамічну плазмову систему з обертальною ковзною дугою з твердими електродами. Електроди виготовлені з міді та нержавіючої сталі. Дану систему можна використовувати, як джерело активних частинок, які інжектуються в реакційну камеру. Оскільки, дуга ковзає по металевому електроду під дією потоку газу, то ресурс роботи такої системи повинен бути набагато більшим ніж за відсутності ковзання та обертання.

Досліджено вольт-амперні характеристики даного розряду залежно від величини потоку газу та режиму роботи (різної полярності електродів). За допомогою високошвидкісної камери досліджено поведінку обертальної ковзної дуги від величини потоку газу та струму розряду. Діагностика плазми проводилась за допомогою методу емісійної спектроскопії. Емісійні спектри реєструвалися за допомогою спектрального приладу S-150-2-3648 USB в діапазоні довжин хвиль 200 - 1000 нм. Визначено температури заселення збуджених електронних, коливальних і обертальних рівнів та їх розподіл вздовж плазмового факела залежно від величини потоку газу та струму. Обчислено відносні концентрації компонент плазми, які спостерігалися на емісійних спектрах плазми, та побудовано їх залежності від величини потоку газу та потужності, яка вкладається в розряд.

Ця робота була зроблена за часткової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Національної академії наук України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

## ПЛАЗМОВИЙ КАТАЛІЗ ГОРІННЯ В'ЯЗКИХ ВУГЛЕВОДНІВ

**О. А. Недибалюк<sup>1</sup>, О. В. Соломенко<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>, Є. В. Мартиш<sup>1</sup>,  
О. Ю. Вергун<sup>1</sup>, С. Г. Орловська<sup>2</sup>, А. І. Ліптуга<sup>3</sup>, Л. В. Симончик<sup>4</sup>,  
В. І. Архипенко<sup>4</sup>, А. А. Кириллов<sup>4</sup>, С. В. Драгнєв<sup>5</sup>, Т. Є. Лиситченко<sup>1</sup>**

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

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

<sup>3</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова, Київ

<sup>4</sup> *Інститут фізики ім. Б. І. Степанова, Мінськ, Білорусія*

<sup>5</sup> *Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ*

Під час спалювання та реформування вуглеводнів із високою в'язкістю виникає проблема їх розпилення. Традиційні газодинамічні форсунки не підходять для вирішення даних задач. Тому створення нових плазмово-рідинних систем, які б дозволяли ефективно розпилювати вуглеводні із високою в'язкістю, є важливим і перспективним напрямком.

В даній роботі досліджено плазмовий каталіз горіння вуглеводнів із високою в'язкістю. Для розпилення вуглеводнів із високою в'язкістю використовується плазмova форсунка. Джерелом плазми була обертальна ковзна дуга та поперечна дуга. Плазмova система складалася з області де утворюється плазма, області де відбувалася часткова конверсія вуглеводнів в синтез-газ та камери згорання в яку інжектувалася плазма з вуглеводнями і продуктами їх реформування. Досліджено вольт-амперні характеристики розряду за наявності та відсутності вуглеводнів в системі. Діагностика плазмового факелу та полум'я відбувалася за допомогою емісійної спектроскопії. Емісійні спектри реєструвалися за допомогою спектрального приладу S-150-2-3648 USB в діапазоні довжин хвиль 200 - 1000 нм. Визначено температури заселення збуджених електронних, коливальних і обертальних рівнів та їх розподіл вздовж плазмового факелу залежно від величини потоку газу та струму. Визначено температури за суцільним спектром випромінювання та побудовано їх аксіальний розподіл в полум'ї під час плазмового каталізу горіння вуглеводнів. Досліджено вплив камери згорання та її розмірів на ефективність плазмової системи.

Ця робота була зроблена за часткової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Національної академії наук України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

## **ПЛАЗМОВО-РІДИННА СИСТЕМА З ОБЕРТАЛЬНОЮ КОВЗНОЮ ДУГОЮ З РІДКИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

**О. А. Недибалюк, В. Я. Черняк, О. В. Соломенко, Є. В. Мартиш,  
Д. Л. Чернолуцький, І. І. Федірчик, Т. Є. Лиситченко**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Важливою задачею для плазмохімії є створення та дослідження плазмових систем, які б працювали за високих тисків та мали великий ресурс роботи. В даній роботі розроблено плазмovo-рідинну систему з обертальною ковзною дугою з рідким електродом та досліджено її властивості. Дана плазмovo-рідинна система є прототипом плазмovo-рідинної системи зі зворотно-

вихровим потоком газу типу “торнадо” з рідким електродом (“ТОРНАДО-РЕ”). Однак, на відміну від “ТОРНАДО-РЕ”, один кінець дуги, обертаючись, ковзає по верхньому металевому електроду. Це дозволить збільшити ресурс роботи верхнього електроду і системи в цілому. Рідкий електрод відновлюється за допомогою неперервної подачі рідини, а металевий електрод витрачається набагато менше за рахунок того, що дуга ковзає по ньому. Вимірні вольт-амперні характеристики даного розряду для двох режимів роботи „твердий” та „рідкий” катод. Досліджено вплив величини потоку газу, під дією якого дуга обертається та ковзає по верхньому електроду, на вольт-амперні характеристики розряду. Досліджено залежність пульсації струму від напруги розряду.

В даній плазмово-рідинній системі реалізується дві області плазми: в проміжку між поверхнею рідини та верхнім металевим електродом; в плазмовому факелі на виході із верхнього металевого електроду. Було досліджено емісійні спектри плазми між електродами та у плазмовому факелі залежно від величини потоку газу та струму розряду. Емісійні спектри плазми реєструвалися за допомогою спектрального приладу S-150-2-3648 USB в діапазоні довжин хвиль 200 - 1000 нм. Визначено температури заселення збуджених електронних, коливальних і обертальних рівнів та їх розподіл вздовж плазмового факелу залежно від величини потоку газу та струму. Обчислено відносні концентрації компонент плазми, які спостерігалися на емісійних спектрах плазми, та побудовано їх залежності від величини потоку газу та потужності, яка вкладається в розряд.

Ця робота була зроблена за часткової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Національної академії наук України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

## **РАДІАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ТУРБУЛЕНТНІЙ ПЛАЗМІ З АНІЗОТРОПІЄЮ ІОННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ**

**В. М. Павленко, В. Г. Панченко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Відомо, що вивчення процесів розсіяння і трансформації хвиль в плазмі є важливим для дослідження властивостей матерії, плазмової діагностики, механізмів трансформації хвиль, вимірювання ефективності дисипації енергії високочастотної накачки тощо.

Вельми актуально зрозуміти роль, яку відіграють флуктуації в процесах розсіяння і трансформації. Очевидно, що інтенсивність цих споріднених процесів буде значно зростати в нерівноважній плазмі, де амплітуда турбулентних флуктуацій суттєво перевищуватиме рівень теплових шумів, характерний



для випадку спокійної плазми.

У роботі на базі кінетичної теорії флуктуацій розглянуто процеси випромінювання в турбулентній плазмі з анізотропією іонної температури, коли має місце трансформація довільної ленгмюрівської хвилі в поперечну електромагнітну. Хвиля накачки, яка діє на плазму, розпадається на дочірню нижньогібридну хвилю та іонно-циклотронні коливання, що поширюються в плазмі, коли температури іонів в напрямках вздовж і поперек магнітного поля різні. Відзначимо, що анізотропний розподіл іонів за температурами є типовим для плазм, що утримуються в адіабатичних схованках.

Обчислено коефіцієнт трансформації в запороговій області параметричної нестійкості і показано, що домінуючий вклад визначається членом, залежним від поля накачки. Отримано залежність інтенсивності випромінювання електромагнітних хвиль від ступеня іонної анізотропії:

$$I \sim \left(\frac{T_{\parallel i}}{T_{\perp i}}\right)^{3/2} \frac{1}{T_{\perp i}^{3/2}} \exp\left(\frac{q}{T_{\parallel i}}\right).$$

Тут стала  $q$  не залежить від іонних температур.

Таким чином, змінюючи співвідношення між іонними температурами  $T_{\perp i}$  і  $T_{\parallel i}$ , можемо збільшити чи зменшити інтенсивність випромінювання енергії електромагнітних хвиль із плазми.

Результати роботи дозволяють прояснити вплив анізотропії іонної температури на радіаційні процеси в космічній і лабораторній плазмі.

## **ПРО СТІЙКІСТЬ ТА КОНВЕРГЕНЦІЮ НАБЛИЖЕНЬ МЕТОДУ ГРЕДА ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ТРАНСПОРТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМІЧНОЇ ПЛАЗМИ**

**П. В. Порицький**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Транспортні коефіцієнти є важливими характеристиками газоплазмових сумішей. Якщо іонізація газів не дуже висока, то їх властивості можна розраховувати в лоренцевому наближенні припустивши домінування окремого виду зіткнень. Електронний перенос при цьому буде найбільш вагомим. Проте із підвищенням температури потрібно брати до уваги зіткнення різних типів важких частинок з електронами так й між собою, що призводить до ускладнення процедури розрахунків.

У кінетичній теорії газів за локальної термодинамічної рівноваги побудовані методи розрахунків транспортних коефіцієнтів. Наразі для розрахунків транспортних властивостей найбільш широко вживаним є метод Чепмена -

Енскога, його деталі добре розроблені. Проте громіздкість обчислень за цим методом швидко зростає зі збільшенням номеру наближень. Крім того, проміжні результати не мають безпосереднього фізичного змісту, тому їх складно контролювати. Зазначених вад позбавлений метод моментів Греда, який виступає альтернативою до методу Чепмена-Енскога. Розрахункова процедура методу Греда значно більш структурована та проміжні стадії легко можна контролювати за допомогою спрощень, наприклад, лоренцевого наближення для плазми.

В доповіді розглянуті особливості розрахунків за методом Греда: стійкість до зміни початкових даних, зокрема транспортних інтегралів; конвергенцію наближень зі збільшенням їхнього номера; вплив певних припущень на точність розрахунків електронних коефіцієнтів залежно від типу газового середовища. Розглянуто розрахунок за наявності в середовищі ефекту Рамзауера - Таунсенда. Показано застосовність методу Греда до розрахунків транспортних властивостей багатокомпонентної термічної плазми. Також, проведено порівняння із відповідною розрахунковою процедурою методу Чепмена - Енскога.

## **ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМИ ІМПУЛЬСНИХ РОЗРЯДІВ У ВОДІ**

**П. В. Порицький, П. Д. Старчик**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Поширені уявлення про розрядні процеси у плазмі імпульсних розрядів в рідині базуються на аналогії з розрядами у газовому середовищі. Вважається, що плазмовий канал після утворення монотонно розширюється завдяки виділенню у ньому енергії електричного струму. Плазма каналів утворюється внаслідок випаровування та іонізації речовини, яка оточує канал, тому теплофізичні властивості плазми розрядів у воді вважаються зумовленими лише властивостями суміші водню і кисню.

У реальних умовах в плазму імпульсних розрядів у воді (ІРВ) неодмінно потрапляють домішки матеріалу електродів та провідників, які застосовуються для ініціювання розрядів із-за високих ізоляційних властивостей води. Контракція рідиною струму на електродах зумовлює появу струменевих ерозійних викидів, при цьому концентрації атомів металів у плазмі ІРВ можуть досягати досить високих рівнів. Практично суцільне заповнення розрядного каналу металеву компонентою відбувається при використанні підводних розрядів для досліджень властивостей матеріалів при екстремальних тисках і температурах. Атоми металів суттєво впливають на властивості плазми таких розрядів і викликають зміни у розподілі струмів та енерговиділення у розрядних каналах. Неоднорідний розподіл металу в плазмових каналах посилює конвективні обмінні процеси, стимулює турбулентне перемішування плазми з оточенням.

У доповіді наведені результати розрахунків теплофізичних властивостей (теплоємності, провідності, ізентропічного коефіцієнту, в'язкості, коефіцієнтів дифузії) багатокомпонентної плазми підводних розрядів в межах характерних для них температур і тисків. Тиски визначені на основі гідродинамічних характеристик розрядів в каналах, температури оцінені по інтенсивності випромінювання плазми. Головними чинниками, які визначають властивості плазми розглянутих розрядів, є вплив газової і плазмової неідеальності та вплив міжчастинкової взаємодії у багатокомпонентному середовищі. З метою урахування вказаних факторів було розроблено розширену процедуру обчислень на основі методу Греда. Перевірка достовірності розрахованих термодинамічних та електричних характеристик плазми виконано шляхом порівняння отриманих результатів з наявними літературними даними та розрахунками за лоренцевим наближенням.

## **ПРОНИКНЕННЯ ОБЕРТОВОГО ПОТЕНЦІАЛЬНОГО ПОЛЯ В ГУСТУ ПЛАЗМУ: СКЕЙЛІНГ ТА ЕФЕКТ НЕОДНОРІДНОСТІ ГУСТИНИ**

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

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

<sup>2</sup> *Токійський університет сільського господарства і технологій, Токіо, Японія*

<sup>3</sup> *Осацький університет, Осака, Японія*

<sup>4</sup> *Інститут космічних і астронавтичних наук, Канагава, Японія*

Проблема ефективного введення ВЧ потенціального поля в плазму є важливою для багатьох прикладних задач, в тому числі для розробки прискорювача плазми спеціального типу (Lissajous Helicon Plasma Accelerator), на основі якого планується створити плазмовий двигун для космічних апаратів [1]. В цьому приладі збудження здійснюється системою зовнішніх електродів, ВЧ потенціали яких зсунуті по фазі таким чином, щоб генерувати обертове електричне поле. Для функціонування цих приладів необхідно забезпечити ефективне проникнення ВЧ поля в об'єм плазми, перешкодою чому може бути екранування поля внаслідок існування граничних неквазінейтральних шарів та об'ємної поляризації неоднорідної плазми. В роботі [1] було проведено моделювання проникнення поля в плазму в спрощеній 1-вимірній моделі з плоско поляризованим полем, і для випадку однорідної плазми знайдено скейлінг цього процесу. У цій роботі процес проникнення поля досліджено в наближеній до реальності циліндричній моделі з обертовим полем, яка враховує як наявність граничного шару, так і об'ємну поляризацію плазми. У разі однорідної плазми аналітично отримано скейлінг для величини поля в плазмі і показано, що умова ефективного проникнення для обертового поля значно жорсткіша, ніж для плоского, а саме, у відношення електронної цик-

лотронної частоти до частоти збудження. В разі неоднорідної плазми показано, що об'ємна поляризація може призводити до локалізації поля в периферійній частині плазмового стовпа, з його істотним послабленням в центральній області. На основі числових розрахунків отримано радіальні розподіли поля для різних профілів густини плазми і виявлено, що ефект периферійної локалізації є суттєвим навіть при помірних ступенях неоднорідності густини.

1. *Matsuoka T., Rudenko T.S., Funaki I. et al.* One dimensional modeling of radio frequency electric field penetration into magnetized plasmas // Japanese J. Appl. Phys. - 2012. - Vol. 51, No. 9. - Id. 096201.

## **ВПЛИВ ПОТЕНЦІАЛУ ТОРЦЕВОГО ЕЛЕКТРОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗРЯДУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМИ ГЕЛІКОННОГО ДЖЕРЕЛА З ПЛАНАРНОЮ АНТЕНОЮ**

**В. М. Слободян, Л. І. Романюк, В. Ф. Вірко, К. П. Шамрай**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Невід'ємними елементами геліконних джерел плазми з планарною антеною є металева циліндрична камера та торцевий металевий електрод, який обмежує систему в поздовжньому напрямку і в технологічних пристроях виконує функцію столика для розміщення оброблюваних зразків. У той час як потенціал камери підтримується незмінним (як правило, земляним), потенціал торцевого електрода може бути плаваючим, або варіюватись в певних границях. В даній роботі з'ясовано залежності плаваючого потенціалу торцевого електрода від режиму розряду та вплив потенціалу зміщення цього електрода на характеристики розряду та властивості плазми.

Експериментальний пристрій являє собою циліндричну металеву розрядну камеру діаметром 20 см та довжиною 30 см, з одного торця обмежену кварцовим вікном, зовні якого розміщена планарна збуджувальна антена, що живиться від ВЧ генератора частоти 13,56 МГц та потужності до 2 кВт. З протилежного боку камера обмежена електродом-столиком (металевим диском) діаметром 15 см, на який подається напруга зміщення (до -100 В). Магнітне поле (до 250 Гс) створюється чотирма соленоїдами з незалежно керованими струмами. Робочий газ - аргон при тиску декілька мТор.

Досліджено залежність плаваючого потенціалу торцевого електрода-столика від величини магнітного поля при використанні антен різних розмірів. Показано, що незалежно від розмірів антени в дослідженому діапазоні магнітних полів плаваючий потенціал електрода-столика є від'ємним і досягає найнижчого рівня (~ -15 В) при високих магнітних полях в режимі з провалом профілю густини плазми на осі.

Досліджено вольт-амперні характеристики торцевого електрода-столика в широкому діапазоні розрядних умов. Показано, що при ВЧ потужності

~1 кВт інтегральний іонний струм насичення на торцевий електрод може досягати  $1,5 \div 2$  А, що відповідає середній густині іонного струму до  $10$  мА/см<sup>2</sup>.

Для різних конфігурацій антени показано, що подача на електрод-столик негативного потенціалу супроводжується значним (до  $30 \div 50$  %) зростанням загального рівня густини плазми. Виміряні радіальні розподіли густини плазми свідчать, що зростання густини переважно локалізується саме там, де в звичайному режимі реєструється пониження плаваючого потенціалу зонда.

Отримані результати переконливо свідчать на користь того, що виявлений в попередніх експериментах аномально низький потенціал плаваючого зонда є наслідком присутності в плазмі значної популяції високоенергетичних не-максвелівських електронів, які, відбиваючись від негативно зарядженого електрода, здійснюють додаткову іонізацію в плазмовому об'ємі. Досліджене джерело здатне забезпечити інтенсивні потоки іонів на поверхню, і тому є перспективним для застосування в технологіях обробки матеріалів. Варіювання потенціалу електрода-столика може бути ефективним засобом керування параметрами плазми в технологічних пристроях на основі геліконної розрядної системи з планарною антеною.

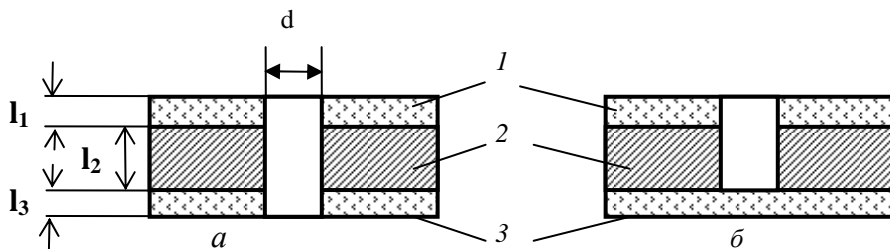
## ВЛАСТИВОСТІ МІКРОРОЗРЯДНИХ СИСТЕМ

**Ок. В. Соломенко, В. Я. Черняк, В. В. Лендел, І. В. Присяжневич**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

Нерівноважна плазма мікророзрядів (МР) атмосферного тиску широко використовується в різних застосуваннях: як захист навколишнього середовища, біології та біомедицині, як інтенсивне джерело ультрафіолету та вакуумного ультрафіолету, для активації поверхонь тощо. Принциповою відмінністю МР від інших розрядів полягає в тому, що в даному розряді співрозмірними є довжина та діаметр розрядного каналу. Але сьогодні залишається відкритим питання, чи виконуються для МР закони подібності характерні для традиційних розрядів.

Робота присвячена дослідженню параметрів МР з різною геометрією (рис) в повітрі низького та атмосферного тиску за допомогою оптичної емісійної спектроскопії, мікроскопії та відеотехніки. Для всіх МР характерною була циліндрична форма порожнин електродів та діелектрику. Дослідження горіння МР проводилися як з порожнинами в двох електродах (рис. а), так і в одному (рис. б). Товщина  $l_1$  змінювалась від 1 мм до 100 мкм при  $l_2 - 0.5 \div 0.8$  мм,  $l_3 - 1 \div 3$  мм. В якості матеріалів електродів обиралися наступні метали: Al, Cu, Nb, Mo, Ti. В якості діелектрику використовувався матеріал Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> або ХС-22. Дослідження проводилися як при постійному струмі, так і в імпульсному режимі.



Зображення досліджуваних конструкцій електродів, де 1 та 3 - електроди; 2 - діелектрична пластина; d - діаметр отвору в 1 та 2; l - товщина 2.

Вивчався вплив зміни діаметру плазмового каналу (відношення висоти порожнини  $l_1 + l_2 + l_3$  – Рис. а, або  $l_1 + l_2$  – Рис. б до діаметру порожнини d на вольт-амперні характеристики МР, також досліджувався характер нерівноважності плазми і вплив матеріалу електродів на напруги пробую  $U_{пр}$  та параметри плазми МР.

До найбільш цікавих результатів в даній роботі можна віднести:

вплив геометрії МР на рівень нерівноважності плазми мікророзрядів. Так виявлено, що рівень нерівноважності плазми вищий для мікророзрядів з двома порожнистими електродми;

помічено глибоку аналогію між мікророзрядом і дифузійним жевріючим розрядом, що була виявлена при використанні в мікророзрядній системі в якості матеріалу електроду, який за нормальних умов вкритий мікропористою плівкою.

Ця робота була частково підтримана Державним фондом фундаментальних досліджень, Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України.

## **ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ РЕДУКЦІЙ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕТВОРЕНЬ СИМЕТРІЇ КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ПЛАЗМИ**

**В. Б. Таранов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Для теоретичних моделей кінетичної теорії плазми, які базуються на інтегро-диференціальних системах рівнянь Власова - Максвелла, легко побудувати відповідну нескінченну систему рівнянь у частинних похідних для моментів функцій розподілу частинок плазми. Група симетрії одержаної системи може бути визначена безпосередньо або шляхом переходу від скороченої системи рівнянь для моментів до повної нескінченної системи. У просторово-одновимірному випадку високочастотних коливань електронної плазми такий

підхід був свого часу успішно реалізований.

У просторово тривимірному випадку був знайдений більш простий шлях визначення симетрії. Нескінченна система рівнянь для моментів спрощується до скінченної системи на певних підмножинах розв'язків. Наприклад, для холодної плазми одержуємо скінченну систему для густини, середньої швидкості компонентів плазми, електричного і магнітного полів. Досить складні рівняння для одержання симетрій такої системи легко розв'язати за допомогою стандартних програм пакету Maple. Підмножина розв'язків холодної плазми є більш симетричною порівняно із загальним простором розв'язків, що дозволяє, знаючи симетрії холодної плазми, відтворити симетрії загальної кінетичної моделі. Таким шляхом були вивчені симетрії просторово тривимірних коливань електронної плазми, електронно-позитронної плазми без магнітного поля і з урахуванням зовнішнього сталого однорідного магнітного поля, можливого збурення магнітного поля.

Іншим прикладом редукції нескінченної системи для моментів є модель водяного мішка, яка дозволяє врахувати скінченну температуру компонентів плазми. Порівняно із холодною плазмою, така модель є менш симетричною, але дозволяє визначити симетрію плазми, що знаходиться у стані з порівняно невеликим відхиленням від рівноважного просторово однорідного стану з певною температурою.

Корисною виявилась також редукція рівнянь для моментів у випадку багатопучкової електронної плазми. Група симетрії холодної електронної плазми у просторово одновимірному випадку є надзвичайно широкою, - нескінченновимірною, - але звертання до системи двох і більше пучків холодної плазми звужує симетрію до повної відповідності із загальною кінетичною теорією.

Таким чином, гідродинамічні редукції суттєво полегшують одержання перетворень симетрії кінетичної теорії плазми Власова - Максвелла і дозволяють застосувати надзвичайно швидкі програми пакету Maple.

## **ШИРИНА РЕЗОНАНСІВ ПРИ ВЗАЄМОДІ ШВИДКИХ ІОНІВ ІЗ МНОЖИННИМИ АЛЬФВЕНОВИМИ НЕСТІЙКОСТЯМИ**

**М. Г. Тищенко, Ю. В. Яковенко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Просторове каналування енергії іонів – це нещодавно відкрите явище, що пояснює аномальні втрати енергії в деяких термоядерних експериментах. Зокрема, в експериментах на сферичному токамаці NSTX спостерігалось наступне: при збільшенні потужності інжекції нейтрального пучка температура в центральній області плазми не змінювалась, а подекуди навіть падала [1]. Експериментатори пов'язали підсилені втрати енергії з плазми з активні-

стю множинних високочастотних ( $f \sim 1$  МГц) мод, ідентифікованих як GAE. У роботі [2] втрати енергії було пояснено просторовим каналуванням енергії швидких іонів – хвилі відбирають енергію від швидких іонів і віддають її в іншому місці. В роботі досліджуються умови, за яких перекриття резонансів частинки з кількома альфвеновими модами веде до формування широкого енергетичного діапазону, в якому рух частинки є стохастичним. У такому випадку дифузія частинки через цю зону відбудеться швидко, і частинка віддасть енергію хвилям, а не плазмі. Знайдено вираз для енергетичної ширини резонансу і оцінено кількість хвиль, яка потрібна, щоб забезпечити дифузію частинки по енергії в широкому енергетичному діапазоні. За оцінками, 5-10 мод з амплітудами  $\tilde{B}/B \sim 5 \cdot 10^{-3}$  достатньо, щоб стохастизувати інтервал енергій від 45 до 90 кеВ і таким чином відібрати половину енергії в інжекттованих іонів у NSTX. Числовими методами проводиться дослідження процесу стохастизації під час перекриття резонансів у двовимірній системі, що описує рух ведучого центру швидкого іона в торіодальній плазмі під дією однієї чи кількох альфвенових хвиль.

1. *Stutman D. et al. // Phys. Rev. Lett. - 2009. - Vol. 102. - P. 115002.*
2. *Kolesnichenko Ya.I. et al. // Phys. Rev. Lett. - 2010. - Vol. 104. - P. 075001.*

## ГЕЛІКОННИЙ РОЗРЯД З ЛІНІЙНОЮ ЗБУДЖУЮЧОЮ АНТЕНОЮ

**В. Ф. Вірко, В. М. Слободян, Ю. В. Вірко, К. П. Шамрай**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Уперше досліджено ВЧ розрядну систему, яка збуджується сильно видо-вженою прямокутною індукційною антеною. Провідники антени розміщені в кварцових трубках, занурених у плазму і розташованих перпендикулярно до зовнішнього магнітного поля. Вимірювання просторового розподілу амплітуд та фаз ВЧ полів показало наявність поздовжніх мод стоячих хвиль між антеною та оброблюваною поверхнею. Перехід між цими модами при зміні напруженості магнітного поля супроводжується стрибками концентрації плазми, характерними для розрядів геліконного типу. В аргоні з тиском 5 мТор, при частоті 13,56 МГц та ВЧ потужності 1 кВт, густина іонного струму на відстані 10 см від антени складає 20 мА/см<sup>2</sup>, що відповідає концентрації плазми  $8 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. В певних режимах було отримано плазму з високим ступенем однорідності на значній відстані вздовж індуктора (неоднорідність не гірша кілька відсотків). За умови збільшення масштабів такий розряд може бути використаний для однорідної обробки значних поверхонь шляхом їх рівномірного переміщення (сканування) перпендикулярно до осі індуктора.



## О МЕХАНИЗМАХ УМЕНЬШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПАДА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

**Л. М. Войтенко, О. А. Федорович**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Київ*

Процессы распада плотной плазмы изучены недостаточно. В работах [1 - 4] было показано, что коэффициенты распада ( $K_p$ ), полученные в плотной плазме импульсных разрядов в воде на несколько порядков ниже, чем рассчитанные для идеальной плазмы. Не было получено однозначной зависимости экспериментальных результатов  $K_p$  от температуры, давления в канале, концентрации атомов в плотной плазме и ее степени неидеальности. В плотной плазме экспериментальные  $K_p$  однозначно зависят только от концентрации электронов ( $N_e$ ) [3].

Существенное увеличение  $K_p$  коррелирует с последовательным появлением в спектрах излучения водородно-кислородной плазмы линий водорода  $H_\alpha$  (50 мкс),  $H_\beta$  (54 мкс),  $H_\gamma$  (63 мкс). Плазма в сплошном спектре при этом становится прозрачной, но в линии  $H_\alpha$  - еще непрозрачная. Аналогичные результаты наблюдаются при рекомбинации вольфрамовой плазмы. На начальной стадии разряда, когда давление, концентрация электронов и температура наиболее высокие, плазма практически не рекомбинирует. При этом нет излучения в сплошном спектре и линий поглощения. С появлением линий поглощения с самыми нижними переходами (с основного состояния на первый возбужденный) начинает идти рекомбинация и увеличивается интенсивность сплошного спектра за счет появления свободно-связанных переходов. Интенсивность континуума за счет свободно-связанных переходов очень низка, так как мало расстояние между отдельными ионами и нет существенных отклонений электронов в полях близко расположенных ионов. При больших значениях ( $N_e$ ) рекомбинация возможна только на невозбужденное основное состояние атома, но сечение такого процесса очень малое. Впервые на такую возможность влияния неидеальности на коэффициент рекомбинации было отмечено в работе [5]. Но расчеты по материалам работы [5] полностью не объясняют большого расхождения с полученными экспериментальными данными.

1. *Fedorovich O.A., Voitenko L.M.* Experimental Reseaches of the Decay Coefficient of Nonideal Plasma Produced at pulsed Discharges in Water // Ukrainian Journal of Physics. - 2008. - Vol. 53, No. 5. - P. 450 - 457.
2. *Федорович О.А., Войтенко Л.М.* О коэффициентах распада НП при взрыве вольфрамового проводника в воде // ВАНТ, сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения». - 2010. - Вып. 7, № 4, (68).
3. *Fedorovich O.A., Voitenko L.M.* The empirical formula of dependence of factor disintegration of nonideal plasma from electrons concentration // Problems of

atomic science and Technology. - 2011. - No. 1 (71). - P. 122 - 124.

4. Федорович О.А., Войтенко Л.М. Экспериментальные исследования коэффициентов распада неидеальной плазмы при концентрациях электронов не превышающих  $10^{22}$  см<sup>-3</sup> // Материалы XV междунар. науч. конф. «ФИРКС». - Николаев, 2011. - С. 66 - 69.
5. Куриленков Ю.К. О влиянии неидеальности на коэффициент рекомбинации плотной плазмы // ТВТ. - 1980. - Т. 18, № 6. - С. 1312 - 1314.

## ТРАНСПОРТНІ ПРОЦЕСИ ШВИДКИХ ІОНІВ У ТОКАМАКАХ

### В. Яворський

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Доповідь присвячена огляду теоретичних та експериментальних досліджень утримання швидких іонів в токамаках за відсутності МГД збурень. В незбуреній плазмі токамака утримання іонів високих енергій визначається так званими класичними транспортними процесами [1, 2], що обумовлені специфікою орбітального руху та кулонівськими зіткненнями із частинками основної плазми. Розглянуті основні механізми втрат швидких іонів пов'язані із класичними транспортними процесами: миттєві, а також дифузійні та конвективні втрати. Проведено детальне порівняння експериментальних даних по втратах іонів інжекції та заряджених продуктів реакцій синтезу із результатами моделювання на токамаках TFTR, JET, JT-60U та інших. Розглянуті також експерименти та моделювання із впливу дифузійного та конвективного переносу на процеси в плазмі токамака, що пов'язані з швидкими іонами (емісія нейтронів, гама випромінювання та нейтралів високих енергій). Проаналізовані результати сучасних прогнозних розрахунків ролі класичних транспортних процесів в утриманні іонів інжекції та заряджених продуктів реакцій синтезу в токамаці ІТЕР.

1. Kolesnichenko Ya.I. // Nucl. Fusion. 1980. - Vol. 20 (6). - С. 727 - 780.
2. Zweben S.J. et al. // Nucl. Fusion. -2000. - Vol. 40 (1). - P. 91 - 149.