

БАГАТОЧАСТИНКОВІ ЯВИЩА У ТЕРМОЯДЕРНИХ СИСТЕМАХ, ПЛАЗМОВІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

*М.О. Азаренков¹, І.Б. Денисенко¹,
О.М. Єгоров², Я.І. Колесниченко³, В.В. Луценко³,
І.М. Оніщенко², К.М. Остріков⁴, Ю.В. Яковенко³*

¹Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

²Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»

³Інститут ядерних досліджень НАН України

⁴Квінсландський університет технології, Австралія

РЕФЕРАТ

1. Вступ

Далекосяжний характер кулонівської взаємодії частинок, з яких складається плазма, обумовлює специфіку цього стану речовини. Для плазми характерними є процеси, що визначаються не лише поведінкою окремих частинок та їх парними зіткненнями, а передусім, одночасною взаємодією багатьох частинок. Багаточастинковість, колективність взаємодії електронів та іонів плазми веде до багатьох цікавих та практично важливих явищ як у високотемпературній, термоядерній плазмі, так і в низькотемпературній плазмі газових розрядів. У багатьох випадках також є істотною взаємодія електронів та іонів з атомами та молекулами робочого газу, а також з частинками нано- та мікро-розміру (порошинками), які доволі часто присутні в плазмі за лабораторних умов та в природі. Дослідити багаточастинкові явища у різних плазмових системах, їхні фундаментальні властивості та можливості практичного застосування є **метою цієї роботи, що складається з циклу публікацій.**

Розглянуто процеси у термоядерній плазмі, які стимульовані швидкими (надтепловими) іонами. Ці іони утворюються внаслідок реакцій ядерного синтезу, інжекції пучків нейтральних атомів та прискорення при високочастотному нагріванні плазми. Вивчення фізичних процесів у плазмі, які пов'язані зі швидкими іонами, належить до ключових напрямків досліджень із керованого термоядерного синтезу. З іншого боку, системи типу «плазма-пучок», де багаточастинкові процеси відіграють ключову роль, покладені в основу плазмової електроніки. Вони використовуються в пучкових та в пучково-плазмових технологіях, а також для створення нових методів прискорення заряджених частинок. Багаточастинкові процеси відіграють важливу роль також у системах для створення нових плазмових технологій, зокрема, для генерації наноструктур.

Цикл робіт являє собою синергізм фундаментальних і прикладних досліджень із фізики плазми, які спрямовані на виявлення нових властивостей багаточастинкових процесів у плазмі, прогрес у вирішенні проблеми керованого термоядерного синтезу, розвиток плазмової електроніки, створення унікальних прискорювачів заряджених частинок, розробку нових плазмових технологій

включно з нанотехнологіями. Автори роботи здобули міжнародне визнання як за їхній внесок до фізики керованого термоядерного синтезу й електроніки, так і до пограничних галузей науки, зокрема до «plasma nanoscience», де вони є піонерами та лідерами світового рівня. Зокрема, вони розробили інноваційні підходи до контролю потоку частинок із плазмового середовища при формуванні наноструктур плазмовими методами та для опису взаємодії плазми з поверхнями твердих тіл. Використовуючи експериментальні та теоретичні підходи, зроблено внесок світового рівня до фізики газових розрядів. Дослідження авторів відкрили нові шляхи для створення різних наноматеріалів, пристроїв наноелектроніки, фотонних структур, приладів для комп'ютерних схем, сонячних батарей, комунікаційних систем та біосенсорів.

Наукова новизна роботи полягає у такому:

- виконано піонерські роботи з термоядерних нестійкостей плазми;
- відкрито критичну енергію швидких іонів в МГД-активній плазмі;
- виявлено нові властивості спектрів МГД-коливань у стелараторах;
- відкрито каналювання енергії та імпульсу надтеплових іонів у нестійкій плазмі;
- вперше показано, що збудження нестійкостей плазми швидкими іонами може вести до аномального транспорту теплових частинок;
- виявлено суттєвий вплив плазми на збільшення ефективності збудження пучками заряджених частинок потужних НВЧ-хвиль у широкому діапазоні частот та на радикальне підвищення високоградієнтного прискорювального поля;
- знайдено умови існування поверхневих хвиль у планарних та циліндричних структурах плазма-метал, плазма-діелектрик-метал, метал-плазма-метал, а також виявлено особливості джерел плазми та генераторів височастотного випромінювання на основі поверхневих хвиль, включно з циклотронним хвилями;
- виконано піонерські роботи з теорії запорошеної плазми, що містить, крім позитивних іонів, негативні іони;
- виявлено нові властивості запорошеної плазми газового розряду, що є в стаціонарному режимі та режимі розпаду;
- вперше теоретично та експериментально показано, що індукційні джерела плазми у діапазоні середніх частот можуть ефективно використовуватися для формування вуглецевих наноструктур;
- проведено піонерські дослідження впливу плазмового середовища на формування та обробку вуглецевих наноструктур.

Практичний вихід проведених досліджень:

- відкрито нові шляхи для створення наноматеріалів, пристроїв наноелектроніки, фотонних структур, приладів для комп'ютерних схем, сонячних батарей, комунікаційних систем та біосенсорів;
- розроблено інноваційні методи контролю потоку частинок із плазмового середовища при формуванні наноструктур;
- створено плазмові НВЧ-пристрої нового типу, а саме, пучково-плазмові

підсилювачі та генератори регулярних і стохастичних коливань;

- закладено фізичні основи для розробки малогабаритних прискорювачів для матеріалознавства, медицини, біології тощо, а також для колайдерів майбутнього, необхідних для вирішення фронтальних проблем фізики високих енергій;
- створено числові коди, які є важливими інструментами для вивчення багаточастинкових явищ у плазмових системах;
- запропоновано інтерпретацію експериментів на провідних токамаках та стелараторах США, ЄС та Японії, зроблено внесок у розробку проекту реактора-стеларатора «Helias» (Німеччина).

2. Короткий зміст роботи

2.1. Фундаментальні дослідження

Нелінійна стадія оберненого згасання Ландау. Відомо, що резонансна взаємодія хвиль із частинками плазми веде до поглинання хвиль унаслідок згасання Ландау, якщо плазма є рівноважною. Натомість, за наявності пучка електронів або іонів механізм Ландау веде до нестійкості плазми. У роботах циклу показано, що з часом функція розподілу пучка по швидкостях платизується (сплощується), внаслідок чого наростання амплітуди хвилі уповільнюється і врешті-решт припиняється [И.Н. Онищенко и др., Письма в ЖЭТФ **12** (1970) 407-411; ЖЭТФ **62**, (1972) 1725-1732].¹ Цей результат належить до базових у нелінійній фізиці плазми зі швидкими іонами.

Новий тип перезамкнення силових ліній магнітного поля. Авторами циклу **вперше показано можливість розщеплення магнітних поверхонь** (а не об'єднання, що відоме з астрофізики та теорії токамаків) унаслідок перезамкнення силових ліній поля. Це дало можливість запропонувати нову модель для опису релаксаційних коливань («пилчастих коливань») у токамаках [Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 3881–3884]. Модель увійшла до відомої монографії американського автора [R.W. White “The Theory of Toroidally Confined Plasmas” (Imperial College Press, 2001)].

Існування поверхневих хвиль. У загальноновизнаних підручниках і монографіях Л.Д. Ландау, Є.М. Ліфшиця, А.А. Рухадзе, А.М. Кондратенка відзначалося, що хвилі поверхневого типу на межі плазма-метал є неможливими. Проте авторами циклу **вперше показано, що тепловий рух частинок плазми та зовнішнє магнітне поле створюють умови для існування поверхневих аксіально-симетричних та азимутальних хвиль на межі плазма-метал** [включено до огляду N.A. Azarenkov, K.N. Ostrikov, Phys. Rep. **308** (1999) 333-428].

Збудження поверхневих хвиль. Показано можливість ефективного параметричного та пучкового збудження поверхневих хвиль у плазмових хвилеводах [Н.А. Азаренков, А.Н. Кондратенко, К.Н. Остриков, ЖТФ **60** (1990)

¹ У цьому рефераті зроблено посилання лише на деякі роботи циклу.

31-36]. Це робить поверхневі хвилі привабливими для створення приладів плазмової електроніки. Цей висновок підтверджено результатами експериментів [T. Ishijima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 036002].

Нелінійна взаємодія хвиль та генерація гармонік у напівпровідниках циліндричної форми, яка зумовлена специфічними, притаманними напівпровідникам нелінійностями. Показано, що ці нелінійності суттєво підвищують ефективність самовпливу, взаємодії, загасання хвиль у порівнянні з традиційними гідродинамічними нелінійностями. Відзначено визначний вклад нелінійності, пов'язаної із зростанням електричного поля поблизу плазмових резонансів біля межі поділу плазма-метал на самовплив поверхневих хвиль [K.N. Ostrikov *et al.*, J. Appl. Phys. **34** (1998) 4176–4179].

Іонно-циклотронне випромінювання з плазми. З'ясовано природу надтеплого іонно-циклотронного випромінювання, яке спостерігається в експериментах на токамаках, а також у космосі [T. Fülöp, Ya.I. Kolesnichenko *et al.*, Nucl. Fusion **37** (1997) 1281–1293]. Показано, що воно виникає внаслідок збудження швидкими іонами магнітозвукових хвиль через циклотронний резонанс, модифікований наявністю дрейфового руху іонів. Розвинена теорія пояснює експериментально спостережені особливості частотного спектру випромінювання.

Спектри альфвенових коливань. Встановлено, що властивості спектру альфвенових коливань у тороїдальній плазмі докорінно змінюються при підвищенні тиску плазми [O. P. Fesenyuk, Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko, Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012) 085014]. Знайдено, що щілини альфвенового континууму анігілюють у точці їх перетину, причому анігіляція може бути повною (щілини зникають). Показано, що біля точки перетину має місце захоплення власних мод – непрозорість для них у певних секторах перерізу плазми. Це явище було підтверджено експериментами на стелараторі W7-AS (Німеччина), в яких деякі нестійкості спостерігались лише на внутрішньому обводі плазми [Yu.V. Yakovenko *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **49** (2007) 535–558].

Просторове каналювання енергії та імпульсу швидких іонів. Це явище було відкрито нещодавно авторами циклу [Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko, V.V. Lutsenko, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 075001 (4pp)]. Воно полягає у тому, що хвилі (власні моди), дестабілізовані енергійними іонами, можуть приводити до ефективної передачі енергії та імпульсу цих іонів з однієї області плазми до іншої. Просторове каналювання енергії та імпульсу швидких іонів може мати місце як у лабораторній, так і в космічній плазмі. Зокрема, воно пояснює експеримент на сферичному торі NSTX (США), де температура в центральній області плазми зменшувалася при збільшенні потужності інжекції пучка нейтральних атомів.

Поширення хвиль у запорошеній плазмі. Створено теорію об'ємних та поверхневих хвиль, що поширюються в неізотермічній запорошеній плазмі, для випадків, коли плазма обмежена діелектриком та металом, та коли вона є магнітоактивною [K. Ostrikov *et al.*, Phys. Rep. **393** (2004) 175-380]. Показано, що порошинки можуть суттєво впливати на фазову швидкість хвиль та їх загасання.

З'ясовано, що на властивості низькочастотних пил-акустичних хвиль суттєво впливають також зіткнення різних частинок та зміна заряду порошинок з часом.

2.2. Колективні процеси в термоядерній плазмі

Збудження нестійкостей плазми надтепловими іонами та явища, що обумовлені цими нестійкостями. Термоядерна реакція веде до виникнення особливого класу нестійкостей плазми, які збуджуються продуктами реакцій ядерного синтезу та іншими швидкими іонами [Я.И. Колесниченко и др., Атомная энергия **23** (1967) 289–291]. Було започатковано вивчення важливого різновиду таких нестійкостей – альфвенових [Я.И. Колесниченко и др., ЖЭТФ **55** (1968) 2210–2212].

Авторами циклу побудовано теорію дестабілізації альфвенових власних мод швидкими іонами в стелараторах. **Відкрито нові резонанси взаємодії частинка-хвиля**, які можуть визначати збудження таких мод у стелараторах. **Передбачено існування «дзеркальних» та «гвинтових» альфвенових власних мод** у стелараторах. Висновки теорії експериментально підтверджено на найбільшому японському стелараторі LHD, а також в експериментах на стелараторі Wendelstein 7-AS (Німеччина) [S. Yamamoto et al., Proc. 29th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys., Montreux, 2002; C.D. Beidler, Nucl. Fusion **41** (2001) 1759-1756]. Вони були використані при розробці концептуального проекту реактора-стеларатора Helias Reactor HSR4/18, а також при розробці програми проведення експериментів на Wendelstein 7-AS (2002 р.).

Відкрито два типи фішбон-нестійкості з частотою, що значно перевищує частоту відомої фішбон-нестійкості (частота нових нестійкостей є близькою до частоти геодезичної акустичної моди). А саме, відкрито резонансну континуумну моду (RCM) і нерезонансну щілинну моду (NGM). Зроблено висновок про те, що ці моди, ймовірно, спостерігалися на токамаку [Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, R.B. White, Nucl. Fusion **50** (2010) 084017].

Показано, що збудження альфвенових хвиль надтепловими іонами може приводити до аномальної (підсиленої) теплопровідності електронної компоненти плазми [Ya.I. Kolesnichenko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 165004(1)–165004(4)]. Це дало можливість пояснити циклічні спади температури плазми в експериментах на стелараторі Вендельштайн 7-AS.

Більшість перелічених результатів увійшла до оглядів авторів циклу [Ya.I. Kolesnichenko, Nucl. Fusion **20** (1980) 727–780; Ya.I. Kolesnichenko et al, Plasma Phys. Control. Fusion **53** (2011) 024007 (46 pp)], до книги [“Fusion Physics” (IAEA, 2012) pp. 1–1119, Ed. by M. Kikuchi, K. Lackner, M.Q. Tran], а також до огляду [M. Hirsch, Plasma Phys. Control. Fusion **50** (2008) 053001 (204 pp)].

Транспорт швидких іонів у магнітогідродинамічно активній плазмі токамаків. Типовою формою магнітогідродинамічної (МГД) активності плазми в токамаках є «пилчасті коливання». **У працях циклу відкрито існування критичної енергії швидких іонів (ε_{cr})**, при перевищенні якої більшість тороїдально захоплених іонів є нечутливою до пилчастих коливань, тоді як пролітні іони

сильно перерозподіляються [Ya.I. Kolesnichenko et al, Nucl. Fusion **36** (1996) 159–172]. Це теоретичне передбачення було пізніше підтверджено в експериментах на американському токамаці-реакторі TFTR, а також при числовому моделюванні [S.S. Medley et al., Nucl. Fusion **38** (1998) 1283–1302]. Показано, що навіть при великих енергіях ($\varepsilon > \varepsilon_{cr}$) існують групи резонансних частинок, які є дуже чутливими до пилчастих коливань.

Нові уявлення дали можливість авторам циклу запропонувати інтерпретацію низки експериментів на найбільших токамаках світу – JET (ЄС) та TFTR (США), а також виконати моделювання новітніх експериментів на DIII-D (США). Зокрема, було дано пояснення загадковому експерименту на JET, де спостерігалось зникнення «гарячої плями» (локалізованої області, що випромінює нейтрони та γ -промені), та пояснено причину виникнення двогорбого розподілу потоку α -частинок на стінку камери TFTR.

Результати розвиненої теорії транспорту швидких іонів включено, зокрема, до оглядів експериментів на TFTR, зроблених американськими авторами [R.J. Hawryluk, Rev. Mod. Phys. **70** (1998) 537–587; S. Zweben et al., Nucl. Fusion (2000) 91–149], огляду [B. Wolle, Phys. Rep. **312** (1999) 1–86] та огляду “Progress in ITER Physics Basis” [Nucl. Fusion **47** (2007) S1–S413]. Частина перелічених результатів увійшла до огляду авторів циклу [Ya.I. Kolesnichenko, et al, Nucl. Fusion **40** (2000) 1325–1341].

Як піонерські, так і сучасні роботи з фізики термоядерної плазми авторів циклу увійшли до нещодавніх фундаментальних оглядів “Energetic particle physics in fusion research in preparation for burning plasma experiments” [N.N. Gorelenkov, S.D. Pinches and K. Toi, Nucl. Fusion **54** (2014) 125001(1)–125001(79)] та “Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas” [L. Chen, F. Zonca, Rev. Mod. Phys. **88** (2016) 015008(1)–015008(72)].

2.3. Плазмова електроніка

Плазмова електроніка виникла після відкриття в 1946 році пучково-плазмової нестійкості Ахієзером і Файнбергом в СРСР та Бомом і Гроссом у США. Широко розгорнуті в ХФТІ теоретичні та експериментальні дослідження цього явища, в яких важливу, а часом вирішальну роль відігравали роботи О.М. Єгорова та І.М. Оніщенко, привели до **створення нелінійної теорії пучкових нестійкостей, концепції високоградієнтного прискорення заряджених частинок колективними полями просторового заряду та великої бази експериментальних результатів, які були використані для побудови і підтвердження висновків теорії пучково-плазмової нестійкості, а також для розробки пристроїв різноманітних практичних призначень.**

Плазмова надвисокочастотна (НВЧ) електроніка. Побудовано нелінійну теорію пучково-плазмової нестійкості [И.Н. Онщенко и др. Письма в ЖЭТФ, **12** (1970) 407-411; I.N. Onishchenko et al., Plasma Physics, **14** (1972) 591-600]. У 1961 році в ХФТІ був експериментально виявлений новий тип електричного розряду – пучково-плазмовий розряд. Його суть полягає в лавинному наростанні густини

електронів, спричиненому іонізацією нейтрального газу електронами плазми, нагрітими НВЧ-полями, що виникають при пучково-плазмовій нестійкості. 1976 року було розроблено теорію пучково-плазмового розряду [И.Н. Онищенко и др., Физика плазмы **2** (1976) 407-413]. Було теоретично [И.Н. Онищенко и др., Физика плазмы **18** (1992) 335-345] та експериментально [А.М. Егоров и др., Атомная энергия **25** (1968) 9-12] досліджено електродинаміку гіромагнітного плазмового хвилеводу. Для пучково-плазмових систем зі зворотнім зв'язком для опису розвитку динамічного хаосу було розроблено новий метод функціонального відображення, яким були виявлені та досліджені амплітудний механізм стохастизації, що відбувається через подвоєння періоду коливань, та більш ефективний фазовий механізм, який призводить до хаосу у вигляді перемежованої турбулентності [И.Н. Онищенко и др., Изв. вузов «Прикладная нелинейная динамика», **1**, (1993) 34-49]. **Розроблено, виготовлено та експериментально випробувано потужні пучково-плазмові генератори регулярного та стохастичного електромагнітного випромінювання** [А.М. Егоров и др., Физика плазмы **20** (1994) 777–781].

Колективні методи прискорення заряджених частинок. Теоретично та експериментально досліджено збудження хвиль густини просторового заряду великої амплітуди в плазмі та в некомпенсованих релятивістських електронних пучках [Я.Б. Файнберг, ЦЕРН 1956]. Реалізовано введення в плазмовий хвилевод НВЧ-хвилі великої амплітуди та прискорення в ній електронного пучка. Теоретично та експериментально на макетах досліджено колективне прискорення іонів хвилями густини просторового заряду, що збуджувались у сильнострумових релятивістських електронних пучках повільною циклотронною хвилею, збудженою самим прискорюваним іонним пучком на аномальному ефекті Доплера (т. зв. авторезонансний метод) [А.М. Егоров и др., Физика плазмы. **23**, (1997) 359-367]; а також повільною хвилею, що виникає при подвійній (часовій і просторовій) модуляції сильнострумового релятивістського електронного пучка [И.Н. Онищенко и др., Физика плазмы **23** (1997) 350-354].

Кільватерний метод прискорення заряджених частинок. Гучний резонанс, що привів до подальшого широкого розгортання робіт на цю тему в десятках лабораторій світу, мають розпочаті в ХФТІ дослідження з прискорення заряджених частинок хвилями густини просторового заряду в плазмі, що збуджуються електронним згустком з великим зарядом або потужним лазерним імпульсом (т. зв. кільватерний метод прискорення). У ХФТІ кільватерний метод вивчається з використанням довгої послідовності електронних згустків, які ежектовані з класичних лінійних прискорювачів, для когерентного збудження кільватерного поля великої сумарної амплітуди як у плазмі [И.Н. Онищенко и др., Физика плазмы **20** (1994) 663-670], так і в діелектрику [I.N. Onishchenko et al., Phys. Rev. E **65** (2002) 066501-11].

Лазерне прискорення іонів плазми. Теоретично досліджено та в числовий спосіб змодельовано джерела нейтронів, генерованих термоядерним спалахом при кумуляції та нагріванні іонів дейтерієвої плазми фемтосекундним потужним кільцевим лазерним імпульсом, що фокусується [А.М. Egorov et al., IEEE Trans.

Plasma Science **36** (2008) 1847-1853]. Споруджено фемтосекундний лазер потужністю сотні мегават, який дає можливість досягти тераватного рівня для досліджень лазерно-плазмового кільватерного методу прискорювання.

Множення частоти та потужності НВЧ-хвиль із використанням рухомої плазми. Досліджено відбиття НВЧ-хвилі від рухомої межі плазми в уповільнювальному середовищі та стискання НВЧ-імпульсу в резонаторі для отримання великої імпульсної потужності та множення частоти [А.М. Егоров і др., ЖЭТФ **30** (1960) 7; ЖТФ **31** (1961) 297-300]. [Результати цих досліджень стали предтечею в розробці найпотужніших на даний час НВЧ-джерел – лазерів на вільних електронах \(ЛВЕ\)](#), у тому числі й плазмових ЛВЕ [О.М. Егоров і др., УФЖ **43** (1998) 1151-1159].

2.4. Фізика плазми газових розрядів та нанотехнології

Теорія запорошеної плазми газових розрядів. Розроблено теоретичні моделі електронегативних розрядів з порошинками субмікронного та нанометрового розмірів [Ostrikov K. et al, Phys. Rep. **393** (2004) 175-380; I. V. Denysenko *et al.*, J. Appl. Phys. **94** (2003) 6097-6107]. З'ясовано, як властивості плазми цих розрядів залежать від зовнішніх умов. Знайдено просторовий розподіл сили захоплення порошинок негативними іонами. Показано, що за високих густин негативних іонів сила захоплення порошинок негативними іонами може бути більшою за силу захоплення позитивними іонами, що кардинально змінює місцезнаходження порошинок у плазмовому об'ємі [I. Denysenko *et al.*, Phys. Rev. E **72** (2005) 016405]. Розроблено нові теоретичні моделі ємнісних розрядів із високою концентрацією порошинок у випадках квазістаціонарної плазми та плазми, що є в режимі розпаду. Відкрито, що збільшення концентрації електронів на самому початку розпаду аргонної запорошеної плазми з високою концентрацією порошинок відбувається, в основному, завдяки генерації електронів унаслідок зіткнень метастабільних атомів між собою [I. Denysenko *et al.*, J. Phys. D **44** (2011) 205204; I. Denysenko *et al.*, Phys. Rev. E **88** (2013) 023104]. Встановлено, що температура електронів спадає швидше у запорошеній плазмі, що розпадається, ніж у звичайній плазмі, де відсутні порошинки. Розроблено непрямий метод вимірювання іонних потоків та концентрації іонів у ВЧ ємнісному розряді, що оперує в імпульсному режимі в різних газових сумішах, включно з запорошеною плазмою. Іонний потік визначено по зміні напруги на електродах у режимі розпаду [I. V. Denysenko et al, Plasma Sources Sci. Technol. **22** (2013) 045009].

Розраховано функції розподілу електронів за енергією (ФРЕЕ) у запорошеній обмеженій плазмі самоузгоджено з амплітудою ВЧ поля, що підтримує плазму, та іншими параметрами розряду. Встановлено, як зіткнення електронів з порошинками впливають на ФРЕЕ, і показано, що у запорошеній плазмі можлива максвелізація ФРЕЕ завдяки непружним зіткненням електронів із порошинками [I. Denysenko *et al.*, Phys. Plasmas **11** (2004) 4959 – 4967]. Досліджено ФРЕЕ та відмінності в просторових розподілах ефективної температури електронів у запорошених індукційних та ємнісних розрядах [I. Denysenko *et al.*, Physical Review E **74** (2006) 036402].

Джерела плазми та створення наноматеріалів плазовими методами. Розроблено теоретичні засади газових розрядів, що підтримуються в планарних та циліндричних структурах електромагнітними поверхневими хвилями різних типів, зокрема, аксіально-симетричними, несиметричними, азимутальними та електрон-циклотронними хвилями. Показано, що тепловий потік електронів суттєво впливає на радіальні розподіли параметрів газових розрядів, що підтримуються поверхневими хвилями у довгих циліндричних трубках за типових експериментальних умов [N. A. Azarenkov *et al.*, *Phys. Plasmas* **8** (2001) 1467-1481].

Розроблено двовимірні теоретичні моделі індукційних джерел аргонної плазми, які підтримуються струмами частоти 13.56 МГц та 0.46 МГц [K. N. Ostrikov *et al.*, *J. Appl. Phys* **92** (2002) 4935-4946], для різних зовнішніх умов (положень витків зі струмом, тисків робочого газу та різних потужностей, що вводиться в розрядну камеру). Пояснено експериментальні дані, здобуті за участі авторів цієї роботи в ХНУ імені В.Н. Каразіна та Наньян технологічному університеті (Сінгапур). Теоретично та експериментально досліджено властивості індукційного джерела плазми, що підтримується струмом частотою 0.46 МГц, за плазмо-хімічного осадження вуглецевих наноконусів (плазма створювалась в Ar/CH₄/H₂ суміші) [I. V. Denysenko *et al.*, *J. Appl. Phys.* **95** (2004) 2713–2724]. Створено теоретичні моделі, які описують формування вуглецевих нановолокон, наноконусів та одношарових нанотрубок на дні розрядної камери [I. Denysenko *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 251501]. Обчислено швидкості росту наноструктур, дифузійну довжину та середню тривалість перебування атомів вуглецю на поверхні наноструктур, зміну температури вздовж нановолокон, як функції зовнішніх параметрів. Показано, що за допомогою низькотемпературної плазми низької густини можна синтезувати наноструктури різних вимірів та форми з високою поверхневою густиною, бажаної геометричної форми та з малим відхиленням від бажаних параметрів. Цього можна досягти завдяки фокусуванню мікрополями наноструктур іонних потоків із плазмового середовища. Цей синтез може відбуватись для доволі низьких температур поверхні, що є дуже важливим для багатьох технологій. Результати теоретичних досліджень було використано для аналізу та оптимізації експериментальних даних науковців Наньянського технологічного університету (Сінгапур) та CSIRO (Австралія), аналізу експериментів інших наукових центрів, а також для контролю росту цих наноструктур в експериментах [K. Ostrikov *et al.*, *Adv. Phys.* **62** (2013) 113-224].

3. Висновки та додаткова інформація, яка характеризує роботу

Представлений цикл праць містить нові уявлення про багаточастинкові явища у різних плазових, а також практичні застосування розвинених уявлень у термоядерних системах, плазовій електроніці, плазових технологіях. Незважаючи на широту спектра розглянутих питань, роботи циклу органічно пов'язані між собою завдяки виконаним фундаментальним дослідженням. Роботи, що увійшли до циклу праць, виконані на світовому рівні. Рівень досліджень і

міжнародний авторитет авторського колективу підтверджується публікаціями у провідних виданнях з найвищими імпаکت-факторами, широким цитуванням робіт циклу, успішним захистом докторських та кандидатських дисертацій, використанням отриманих результатів не лише в Україні, а й у багатьох провідних лабораторіях світу.

Більшість робіт циклу опубліковано у міжнародних та радянських журналах, як загально-фізичних (Reviews of Modern Physics, Physics Reports, Physical Review Letters, Applied Physics Letters, Physical Review E, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ тощо), так і спеціалізованих (Nuclear Fusion, Plasma Physics and Controlled Fusion, Physics of Plasmas, Атомная энергия тощо). Роботи циклу опубліковано також в українських реферованих журналах (Український фізичний журнал, Питання атомної науки і техніки). Усі основні результати цих робіт доповідалися на багатьох міжнародних та національних конференціях, у тому числі у вигляді доповідей на запрошення. Проте тези та анотації доповідей за деякими винятками не включено до списку публікацій.

За тематикою циклу захищено 15 докторських дисертацій та 39 кандидатська дисертація, а автори роботи були науковими керівниками у 33 кандидатських дисертаціях та науковими консультантами у 11 докторських дисертаціях.

До циклу включено 178 наукових праць, серед яких 8 монографій, 15 оглядів, а також 151 стаття в наукових періодичних виданнях (з них 123 – у зарубіжних виданнях). За даними Thomson Reuters Web of Science, відібрані наукові праці отримали 5411 цитувань, а їхній h-індекс = 39; за даними Google Scholar загальна кількість посилань на ці праці складає 6568, їхній h-індекс = 45.

Автори:

М.О. Азаренков

І.Б. Денисенко

О.М. Єгоров

Я.І. Колесниченко

В.В. Луценко

І.М. Оніщенко

К. М. Остріков

Ю.В. Яковенко