

ПЕРЕХІДНЕ ВИПРОМІНЕННЯ ЯК МОЖЛИВИЙ МЕХАНІЗМ РАДІОВИПРОМІНЕННЯ МОДУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ В АКТИВНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ В ІОНОСФЕРІ

Стаття присвячена проблемам перехідного випромінювання модульованих електронних пучків в умовах активних плазмово-пучкових експериментів у іоносфері. Оглянуто різні типи плазмових неоднорідностей, вплив магнітного поля, фронтів електронного пучка. Розглянуто, зокрема, ефекти, що можуть підсилювати перехідне випромінення — збудження резонансних коливань обмеженого плазмового утворення, збудження квазівласної бічної хвилі на межі вакуум—плазма, збудження області локального плазмового резонансу слабконеоднорідної плазми, просторовий резонанс між акустичною хвилею в плазмі, хвилею струму та випромінюваною хвилею. Обговорюється можливе застосування перехідного випромінення для діагностики неоднорідних плазмових утворень.

Вступ

Активні плазмово-пучкові експерименти в іоносфері розпочалися наприкінці 1960-х рр. в США і тривали більш-менш регулярно до середини 90-х рр. У процесі їх проведення з борту ракети або супутника здійснювалася інжекція електронних пучків в іоносферну плазму [1—3]. Одним з найцікавіших результатів таких експериментів було спостереження радіовипромінення, що виникало під час інжекції [1,4—7]. Зокрема, при інжекції модульованих електронних пучків спостерігалася радіовипромінення на частоті модуляції. Наприклад, в експерименті АПЕКС субсупутник, що знаходився на віддалі порядку 80 км від основного супутника, з борту якого здійснювалася інжекція електронного пучка, зафіксував випромінення на гармоніках частоти 2 МГц — частоти модуляції пучка, що мала форму меандра [7].

Зараз у літературі активно обговорюється питання про механізми радіовипромінення електронних пучків, що інжектуються в іоносферну плазму під час виконання активних плазмово-пучкових експериментів [5—6, 8—21]. Для немодульованих пучків такими механізмами виступають запалювання плазмово-пучкового розряду [8—9] (на порівняно невеликих висотах, де існують достатні концентрації нейтрального газу), розвиток випромінювальних нестійкостей у системі електронний пучок — фонова плазма [10—11], збудження коливань потенціалу інжектора фронтами імпульсу струму інжекції [12]. Параметри випромінення в усіх перерахованих ви-

падах визначаються властивостями пучка, фонової плазми та інжектора, а спектр випромінення звичайно є досить широким.

Особливий інтерес становить випадок інжекції модульованих електронних пучків. У цьому випадку частота (або спектр) випромінення задається характером модуляції. Механізмами випромінення можуть бути черенковське збудження власних хвиль однорідної фонової плазми, що перебувають у синхронізмі з пучком [13—15] (це, звичайно, можливо за наявності магнітного поля, що стосовно до іоносфери означає низькі частоти модуляції пучка) та перехідне випромінення на неоднорідностях плазми [16—21]. В ролі таких неоднорідностей можуть виступати: плазмовий струмінь, що в багатьох випадках інжектується з борту космічного апарата заради його нейтралізації одночасно з інжекцією електронного пучка [22]; підвищена концентрація фонової плазми, що виникає навколо космічного апарата внаслідок того, що в процесі інжекції електронного пучка він заряджається позитивно; плазмовий шар, що оточує космічний апарат при проходженні останнім з великою швидкістю крізь щільні шари атмосфери [23]; періодичні неоднорідності фонової плазми, обумовлені, наприклад, збудженням у ній акустичних хвиль; випадкові неоднорідності фонової іоносферної плазми [24]. Оскільки неоднорідності плазми існують завжди, а, з іншого боку, перехідне випромінення може виникнути в будь-якому частотному діапазоні, то саме цей механізм викликає особливий інтерес.

Зазначимо, що перехідне випромінення модульованих електронних пучків у неоднорідній плазмі спостерігалось в лабораторних експериментах [25—26].

Мета цієї статті — описати основні особливості перехідного випромінення, що можуть мати місце при інжекції модульованих електронних пучків у неоднорідну плазму з борта космічного апарата.

1. Перехідне випромінення модульованого електронного пучка, що падає на різку межу плазми

Відзначимо перш за все, що в більшості праць, присвячених перехідному випроміненню модульованих електронних пучків у неоднорідній плазмі, використовується модель плоскошаруваної плазми (вважається, що концентрація плазми змінюється лише вздовж однієї з осей декартової системи координат). Виявленню меж чинності такої моделі спеціально присвячено працю [27]. В ній введено поняття поперечного розміру зони формування перехідного випромінення, який визначається поперечними розмірами області локалізації електромагнітного поля модульованого електронного пучка. Якщо на цьому розмірі властивості середовища в поперечному напрямку змінюються мало, то його можна вважати плоскошаруватим.

Найпростішою моделлю плазмової неоднорідності може вважатися різка межа вакуум—плазма. На невеликих віддальх від інжектора в першому наближенні такою можна, очевидно, вважати межу струменя плазми, що викидається з борту космічного апарата з метою його нейтралізації (див. вступ). Електронний пучок, рухаючись під дією магнітного поля, може входити в такий плазмовий струмінь. Якщо частота його модуляції і електронна ленгмюрівська частота плазми набагато більші від електронної циклотронної частоти геомагнітного поля, впливом останнього на властивості плазми можна знехтувати.

Перехідне випромінення циліндричного модульованого електронного пучка, що нормально падає на різку межу вакуум—холодна ізотропна плазма, детально досліджено в праці [17]. Розраховано діаграму спрямованості та повну потужність випромінення залежно від параметрів задачі. Для даної моделі випромінення є р-поляризованим. Показано, що у випадку, коли плазма є докритичною, діаграма спрямованості у вакуум має різкий максимум, обумовлений збудженням так званої бічної хвилі — деякої квазі-власної слабкозгасаючої за радіаційним механізмом моди, що може існувати на різкій межі вакуум—ізотропна плазма. Справді, в цьому ви-

падку випромінення відбувається як у вакуум, так і в плазму. Зокрема, в плазмі збуджується хвиля, що рухається паралельно до межі розподілу середовищ. Вона зазнає заломлення і виходить у вакуум під граничним кутом повного внутрішнього відбиття, формуючи вказаний різкий максимум у діаграмі спрямованості.

В праці [17] зроблене також цікаве спостереження щодо ефективності випромінення, яка визначається так званим електронним коефіцієнтом корисної дії — відношенням випромінюваної потужності до потужності пучка. Оскільки перша з цих величин пропорційна квадратові струму, а друга (при фіксованій прискорюючій напрузі) — самому струму, то ефективність випромінення зростатиме із збільшенням струму пучка (при фіксованій глибині його модуляції).

В праці [18] розглянуто перехідне випромінення модульованого електронного пучка, що інжектуються з поверхні металевої сфери, оточеної сферичним шаром однорідної ізотропної плазми з різкою межею. Очевидно, йдеться про космічний апарат, навколо якого існує підвищена концентрація фонові плазми, обумовлена його позитивним потенціалом (див. вступ). Автори показали, що такий плазмовий шар можна розглядати як своєрідний відкритий резонатор, втрати якого (за відсутності дисипації) обумовлені випроміненням у навколишній простір. Якщо модульований пучок резонансно збуджує коливання такого резонатора, це супроводжується помітним зростанням перехідного випромінення. Слід, однак, зазначити, що модель з різкою межею плазми, проаналізована в [18], не враховує дисипації в околі точки локального плазмового резонансу, що може існувати в плазмі з розмитою межею. Тому, на нашу думку, питання про добротність власних коливань відкритого плазмового резонатора потребує додаткового дослідження.

Слід відзначити, що в працях [17—18] розглядалося нормальне падіння електронного пучка на плазму. Втім, як впливає із наведеного вище, в реальному експерименті можна скоріше за все чекати, що електронний пучок падатиме на плазму похило. Така модель для випадку стрічкоподібного модульованого електронного пучка була розглянута в [28]. Задача розв'язувалася шляхом розкладу струму модульованого електронного пучка обмеженого перерізу по плоских парціальних хвилях струму. З'ясувалося, що у випадку, коли вектор густини змінного струму пучка не лежить у площині падіння хвильового вектора плоскої хвилі струму, остання породжує, поряд з р-поляризованим, також і 5-поляризоване перехідне випромінення. Величина останнього стає помітною для релятивістських

пучків. Показано, що для докритичної плазми можливе збурення s -поляризованої бічної хвилі, але обумовлене цим зростання перехідного випромінення виявлене менше, ніж для p -поляризованих хвиль.

Якщо швидкість модульованого електронного пучка прямує до швидкості світла, у вакуумі його електромагнітне поле різко зростає. Це обумовлено наближенням до черенковського резонансу з електромагнітними хвилями (точний резонанс не може мати місця, бо швидкість електронів завжди залишається досвітловою). В плазмі, де фазова швидкість електромагнітних хвиль перевищує швидкість світла (докритична плазма) або поширення електромагнітних хвиль взагалі неможливе (закритична плазма), поле пучка різко зменшується. В результаті для релятивістських пучків на межі вакуум—плазма відбувається значна перебудова їхнього електромагнітного поля. При цьому спостерігається значне зростання перехідного випромінення, обумовленого вказаною перебудовою [28]. Зростання перехідного випромінення для релятивістських заряджених частинок відзначалося в монографії [29].

В праці [28] досліджено також залежність повної потужності випромінення від кута між швидкістю модульованого електронного пучка та нормаллю до поверхні плазми. З'ясовано, що для пучків із достатньо великими поперечними розмірами (порядку і більше довжини випромінюваних хвиль) максимум випромінюваної потужності досягається саме при похилому падінні пучка. Це обумовлено тим, що при нормальному падінні максимум у спектрі парціальних плоских хвиль струму, по яких розкладається електронний пучок, припадає на мінімум коефіцієнта трансформації (чисто поздовжня хвиля струму не породжує перехідного випромінення, бо її поле не зазнає перебудови на стрибку концентрації плазми). Подібний ефект для випадку слабконеоднорідної плазми було відзначено в [30].

Було також виконано розрахунки для похилого падіння на межу плазми циліндричного модульованого електронного пучка. Показано, що для пучків з поперечним розміром, набагато меншим від довжини випромінюваних хвиль, діаграма спрямованості, по суті, залишається аксіально симетричною. В протилежному випадку аксіальна симетрія різко порушується.

Ефективність випромінення, розрахованого в [28], для типових умов активних плазмово-пучкових експериментів (струм інжекції — 1 А, енергія електронів — 2 кеВ, глибина модуляції пучка — 100 %) становила до 1 %.

Як уже зазначалося, впливом геомагнітного поля на плазму можна знехтувати, якщо, зокре-

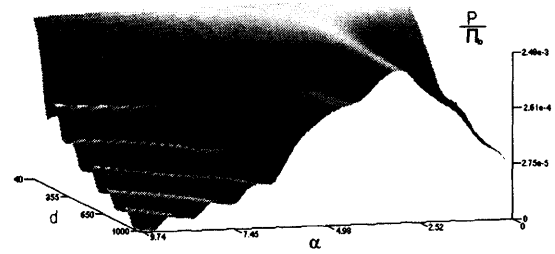


Рис. 1. Залежність повної потужності випромінення стрічкоподібного модульованого електронного пучка на різкій межі ізотропної плазми (у логарифмічному масштабі) від ширини пучка та кута падіння α : $\gamma = 0$; $\beta = 0,1$; $\epsilon = 0,3$; $k_0 d = 16,65$; $J_m d = \text{const}$

ма, частота модуляції електронного пучка значно перевищує відповідну електронну циклотронну частоту. Якщо ця умова не виконується, вплив геомагнітного поля на випромінення і поширення електромагнітних хвиль є істотним. Це типово для багатьох активних плазмово-пучкових експериментів, де спостерігалось, зокрема, збудження пучком хвиль у свистовому діапазоні частот [4—5].

Перехідне випромінення свистових хвиль ниткоподібним модульованим електронним пучком на стрибку концентрації плазми розраховане в праці [31]. Магнітне поле вважалось нормальним до межі двох напівпросторів з відмінними концентраціями плазми. Вважалось, що в одній з областей виконано умови свистового наближення [32] (фонова іоносферна плазма), концентрація плазми в другій області спрямовувалась до нескінченності (плазмовий струмінь, інжектований з борту космічного апарата).

Як відомо [32], для плоских свистових хвиль залежність напрямку потоку енергії від напрямку хвильового вектора є немонотонною: внесок до потоку енергії заданого напрямку можуть давати дві хвилі з відмінними значеннями компоненти хвильового вектора, нормальної до магнітного поля. При цьому кут між напрямком потоку енергії хвилі і магнітним полем не може перевищувати деякої граничної величини (приблизно 20°). Ці особливості й визначають вигляд діаграми спрямованості (рис.2). В табл. 1 для типових умов активних плазмово-пучкових експериментів у іоносфері (висота — $300 \div 700$ км,

Таблиця 1
Висотна залежність параметрів досліджуваного випромінення

Дані про параметри іоносфери взято з [34]

Висота, км	ω_{pe}, c^{-1}	ω_{He}, c^{-1}	P, Вт	$\Psi_{opt}, ^\circ$
300	$3,0 \cdot 10^7$	$7,7 \cdot 10^6$	1,05	7,4
400	$4,5 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^6$	4,4	7,8
500	$6,0 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^6$	12,2	8,2
700	$3,0 \cdot 10^7$	$6,4 \cdot 10^6$	2,1	8,6

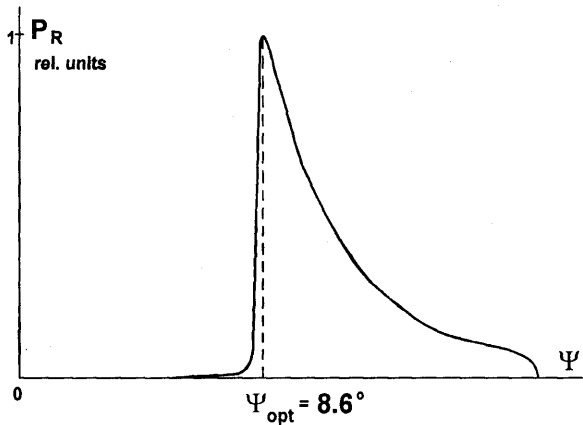


Рис. 2. Кутова залежність радіальної компоненти вектора Пойнтинга перехідного випромінення вістлерів модульованим електронним пучком на стрибку концентрації плазми

амплітуда змінного струму пучка — 1 А, енергія електронів — 2 кеВ) наведено повні потужності випромінення та аксіальні кути, що відповідають максимуму діаграми спрямованості, разом з відповідними значеннями електронної плазмової та електронної циклотронної частот [32].

Зазначимо, що модульований електронний пучок може, окрім вістлерів, збуджувати за механізмом перехідного випромінення і інші власні моди магнітоактивної плазми — наприклад, альвенівські хвилі [33].

2. Перехідне випромінення модульованого електронного пучка, що падає на розрив між ізотропною плазми

У праці [35] досліджено перехідне випромінення модульованого електронного пучка в сильнеоднорідній плазмі, коли характерний розмір перехідної області набагато менший від довжини хвилі випромінення. Така модель неоднорідності може розглядатися як проміжна між різким стрибком концентрації та слабконеоднорідною плазмою (коли характерний розмір неоднорідності набагато більший від довжини випромінюваної хвилі). Показано, що в цьому випадку у складі перехідного випромінення можна виділити дві компоненти — ту, що обумовлена зміною концентрації в межах поздовжнього розміру зони формування перехідного випромінення [29], та випромінення з області локального плазмового резонансу. Співвідношення між цими складовими залежить від характерного розміру неоднорідності. Із зростанням останнього внесок резонансної складової випромінення збільшується. Співвідношення фаз зазначених складових залежить від напрямку руху пучка. Для пучків, що входять у плазму, вони додаються, для пучків, що виходять з плазми — віднімаються. Тому в останньому випадку за деяких

умов перехідне випромінення може взагалі зникнути. Відзначимо, що умови, близькі до такої моделі, було реалізовано в експерименті [26].

Випромінення стаціонарно інжектваного циліндричного модульованого електронного пучка обмеженої довжини, що рухається крізь слабконеоднорідну ізотропну плазму, було розглянуто в [16]. Задача розв'язувалася в лінійному наближенні, самоузгоджено, тобто з урахуванням еволюції хвиль пучка у неоднорідній плазмі. Відзначено ефект демодуляції при наближенні до області локального плазмового резонансу для електронного пучка, що входить у плазму. Показано, що збудження електромагнітних хвиль в такій моделі обумовлене двома механізмами: це випромінення, пов'язане з обмеженою довжиною пучка (воно можливе і в однорідному середовищі, в тому числі у вакуумі), та перехідне випромінення. Це останнє істотно залежить від напрямку руху пучка: воно є помітним для пучків, що входять у плазму, і відсутнє для пучків з протилежним напрямком руху (більш акуратний розрахунок [35] показав, що перехідне випромінення матиме місце і в цьому випадку, але його інтенсивність буде на півтора—два порядки меншою). Слід, однак, відзначити, що діаграма спрямованості перехідного випромінення, обрхована в [16], має максимум вздовж напрямку руху пучка, що не відповідає дійсності (використане автором наближення не справджується для малих кутів між градієнтом концентрації плазми та хвильовими векторами випромінення). Тому отримані в праці вирази для повної потужності випромінення є істотно неточними.

Відзначимо, що питання про еволюцію модульованого електронного пучка в слабконеоднорідній плазмі розглядалося також у праці [36]. Крім вже відзначеного ефекту демодуляції пучка в околі точки локального плазмового резонансу, там показано також, що в цій області пучок збуджуватиме помітні коливання напруженості електричного поля (які спостерігалися експериментально). Спеціальну увагу приділено взаємній трансформації швидкої та повільної хвиль просторового заряду на неоднорідності плазми. Показано, зокрема, що в неоднорідній закритичній плазмі вона призводитиме до зростання швидкої хвилі просторового заряду, котра в однорідній закритичній плазмі згасає.

Праця [37] спеціально присвячена питанню про перехідне випромінення аксіально-симетричного модульованого електронного пучка, що входить у холодну слабконеоднорідну ізотропну плазму зі слабкими зіткненнями, рухаючись вздовж градієнта її концентрації. Задачу розв'язано в наближенні заданого струму пучка, який

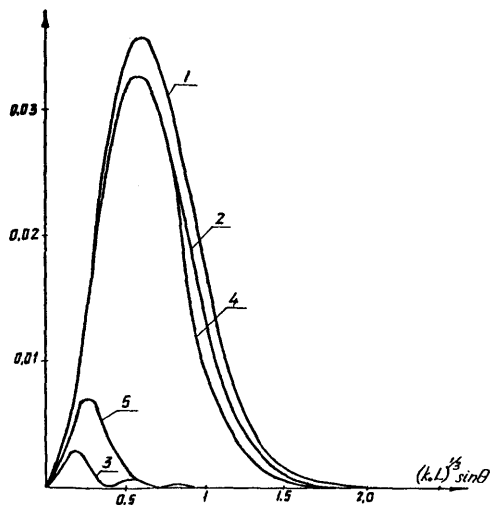


Рис. 3. Діаграма спрямованості випромінювання циліндричного модульованого електронного пучка у слабконеоднорідній ізотропній плазмі. 1 — ниткоподібний пучок, 2, 3 — пучок з рівномірним радіальним розподілом густини струму: $2 - (k_0 a)(k_0 L)^{-1/3} = 1$; $3 - (k_0 a)(k_0 L)^{-1/3} = 10$; 4, 5 — пучок з гаусівським радіальним розподілом густини струму: $4 - (k_0 a)(k_0 L)^{-1/3} = 1$; $5 - (k_0 a)(k_0 L)^{-1/3} = 5$

подається у вигляді пакета парціальних плоских хвиль. Показано, що діаграма спрямованості випромінювання має воронкоподібний характер (рис. 3). Для хвиль, що випромінюються під великими кутами до осі пучка, помітним виявляється бар'єр непрозорості між точкою локального плазмового резонансу і точкою повороту хвилі. Для хвиль, що випромінюються під малими кутами, поле виявляється майже ортогональним до поля парціальної хвилі струму, яка її породжує, тому відповідний коефіцієнт трансформації прямує до нуля. Таким чином, максимум діаграми спрямованості припадає на малі кути, величина яких зменшується із зменшенням градієнта концентрації плазми. Отримано також вираз для повної потужності випромінювання, величина якого за типових умов активних плазмово-пучкових експериментів може складати величину порядку 10 Вт і більше.

В експерименті іноді спостерігалися сплески випромінювання в момент початку інжекції електронного згустка [6]. Як уже вказувалося (див. вступ), їх традиційно пояснювали коливаннями потенціалу космічного апарата, які збуджують у фоновій плазмі ленгмюрівські хвилі, що, в свою чергу, трансформуються в електромагнітні [6, 12]. Але такі сплески можна, в принципі, інтерпретувати як перехідне випромінювання при проходженні фронтів електронного згустка через плазмові неоднорідності. Ефекти, обумовлені проходженням фронтів модульованого електронного згустка крізь слабконеоднорідну ізотропну плазму, розглядалися в [38]. Як показав розрахунок, при проходженні фронтів згустка крізь

плазмову неоднорідність справді повинні мати місце сплески випромінювання в широкому діапазоні частот, тривалість яких приблизно збігається з часом проходження фронту крізь плазмову неоднорідність (рис. 4). При розмиванні фронтів згустка інтенсивність вказаних сплесків різко зменшується. В проміжку між сплесками має місце монохроматичне випромінювання на частоті модуляції.

В більшості випадків при розв'язанні задач про перехідне випромінювання модульованих електронних пучків плазма вважалася лінійним середовищем. Втім, як уже відзначалося, модульований електронний пучок збуджує в області локального плазмового резонансу значні коливання електричного поля, височастотний тиск яких може деформувати профіль концентрації плазми. Оцінки, наведені в [39], показують, що така деформація для випадку слабконеоднорідної ізотропної плазми матиме місце вже при густині змінного струму пучка порядку 10 мА. Більш акуратно деформація профілю концентрації плазми, обумовлена збудженням у ній ленгмюрівських хвиль модульованим електронним пучком, розглядалася в [40] (для стаціонарного та нестационарного випадків). Показано, що характер деформації залежить від напрямку руху пучка. Це обумовлено тим, що в слабконеоднорідній плазмі існують дві точки найбільш інтенсивної трансформації хвилі струму в ленгмюрівську хвилю — точка локального плазмового резонансу і точка черенковського резонансу. Результат взаємодії хвиль, збуджених пучком у цих двох точках, з урахуванням дисипації істотно залежить від напрямку руху пучка.

Спробу розрахувати перехідне випромінювання на деформованому профілі концентрації було зроблено в праці [41]. Розглядалися два варіанти деформації — утворення в області локального плазмового резонансу ямки густини або різкого стрибка концентрації. Показано, що в обох

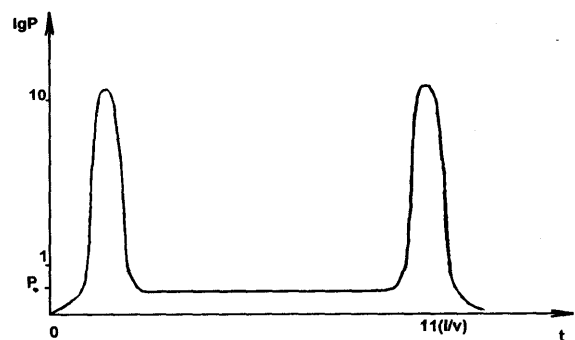


Рис. 4. Часовий хід повної потужності перехідного випромінювання модульованого електронного згустка скінченної тривалості ($v_0/c = 0,1$; $l/L_0 = 10$; $m = 0,5$)

випадках деформація профілю концентрації плазми веде до зменшення перехідного випромінення для пучків, що входять у плазму, і його зростання для пучків, що рухаються в протилежний бік. В окремих випадках, коли пучок резонансно збуджує квазізаперті хвилі в резонансній області, можливі сплески випромінення (втім, їхній рівень менший від випромінення на недеформованому профілі для пучка, що рухається в плазму). Таким чином, деформація профілю концентрації веде, взагалі кажучи, до зменшення впливу напрямку руху пучка на перехідне випромінення.

3. Перехідне випромінення модульованого електронного пучка на неоднорідностях фонові іоносферної плазми

Як уже вказувалося (див. вступ), неоднорідності, на яких виникає перехідне випромінення, можуть бути пов'язані з фоновію іоносферною плазмою. Наприклад, це може бути періодична неоднорідність, обумовлена збудженням у плазмі акустичної хвилі. Одним з механізмів її виникнення може бути трихвильова взаємодія за участю електромагнітної хвилі (випромінення) та повільної хвилі просторового заряду електронного пучка. Оскільки остання має від'ємну енергію, взаємодія хвиль може за певних умов мати характер вибухової нестійкості [42].

Перехідне випромінення тонкого модульованого електронного пучка у періодично неоднорідній ізотропній плазмі було розраховано в [43]. Швидкістю акустичної хвилі було знехтувано в порівнянні зі швидкістю електронного пучка (тим самим не враховувався невеликий доплерівський зсув частоти випромінення). Розміри стратифікованої області плазми (по суті, довжина цугу акустичних хвиль) вважалися скінченними. Оскільки в реальних ситуаціях збурення, обумовлене збудженням акустичної хвилі, змінює концентрацію плазми відносно мало, змінна складова діелектричної проникності в розрахунку вважалася малим параметром. Було показано, що перехідне випромінення різко зростає за виконання умови так званого просторового резонансу. Суть її зводиться до того, що випромінення від двох сусідніх неоднорідностей плазми в деякому напрямку (вперед або назад щодо руху пучка) повинно додаватися у фазі [29]. Типові діаграми спрямованості для цього випадку наведено на рис. 5. Висота максимуму виявляється пропорційною до розміру стратифікованої області, вимірюваному в просторових періодах модуляції плазми, а його ширина — обернено пропорційною до вказаної величини. Як і в попередніх випадках, оцінки повної потужності випромінення, зроблені для типових умов активних плаз-

мово-пучкових експериментів у іоносфері, показали, що вказану потужність цілком можна зафіксувати в експерименті [20].

Слід, однак, відзначити, що для нерелятивістських пучків умова просторового резонансу для випромінення в ізотропній плазмі вимагає, щоб просторові періоди модуляції плазми та електронного пучка були досить близькі один до одного, чого в реальних умовах чекати важко. Названа умова знімається для релятивістських пучків, а також для випромінення низькочастотних (наприклад, свистових) мод.

Існує формальна аналогія між перехідним випроміненням модульованого електронного пучка та проходженням сигналу через лінійний фільтр. Як відомо, для отримання максимального сигналу на виході слід використовувати так званий узгоджений фільтр, максимум передавальної функції якого збігається з максимумом у спектрі сигналу. Ця ідея була використана в праці [43] для з'ясування умов отримання максимального перехідного випромінення в системі неоднорідна докритична плазма — радіально обмежений аксіально-симетричний модульований електронний пучок. Було показано, що оптимальний радіус пучка повинен бути порядку довжини випромінюваної хвилі. Оптимальна неоднорідність для випадку нерелятивістських пучків також повинна мати розмір порядку довжини випромінюваної хвилі і бути промодульована з просторовим періодом, близьким до просторового періоду модуляції пучка. Для релятивістських пучків вказаний період модуляції зростає.

Крім регулярних неоднорідностей, іоносферна плазма завжди містить також випадкові, нерегулярні неоднорідності, рівень яких особливо високий в авроральних областях іоносфери [24]. Розрахунок перехідного випромінення на таких неоднорідностях, обумовленого потоками електронів природного походження, було виконано в праці [45]. В праці [46] було розраховано випромінення для моделі плоскошаруватої випадково-неоднорідної ізотропної плазми, крізь яку рухається тонкий напівобмежений модульований електронний пучок, змінний струм якого в просторі експоненційно релаксує. Було показано, що випромінення в цьому випадку може бути обумовлене поздовжньою обмеженістю пучка (див. п.1), а також перехідним механізмом (розсіюванням електромагнітного поля пучка на плазмових неоднорідностях). З'ясувалося, що для нерелятивістських пучків внесок у перехідне випромінення робить лише вузька смуга хвильових чисел зі спектра плазмової неоднорідності, для яких виконано умову просторового резонансу. Однак в авроральних областях іоносфери і це випромінення можна зафіксу-

вати в типових умовах активних плазмово-пучкових експериментів.

Слід, однак, зазначити, що при інжекції електронного пучка вздовж силових ліній геомагнітного поля плазмову неоднорідність навряд чи можна вважати плоскошаруватою. Тому ця задача вимагає, на наш погляд, додаткового аналізу з урахуванням реального характеру неоднорідності іоносферної плазми.

4. Про можливість діагностики плазмових утворень за перехідним випроміненням

В ядерній фізиці добре відомі так звані лічильники частинок на перехідному випроміненні [29]. Принцип їхньої роботи заснований на тому, що перехідне випромінення несе інформацію і про заряджену частинку, яка його збуджує, і про неоднорідність, на якій воно відбувається. Тому, пропускаючи частинки через неоднорідність з відомими властивостями, можна за перехідним випроміненням судити про їхні енергії та заряди. Але можна, в принципі, робити і навпаки — за перехідним випроміненням частинок з відомими властивостями судити про параметри неоднорідності. Ця ідея лежить в основі діагностики плазмових неоднорідностей за перехідним випроміненням, вперше запропонованої в [47].

В праці [47] розраховано перехідне випромінення ниткоподібного модульованого елект-

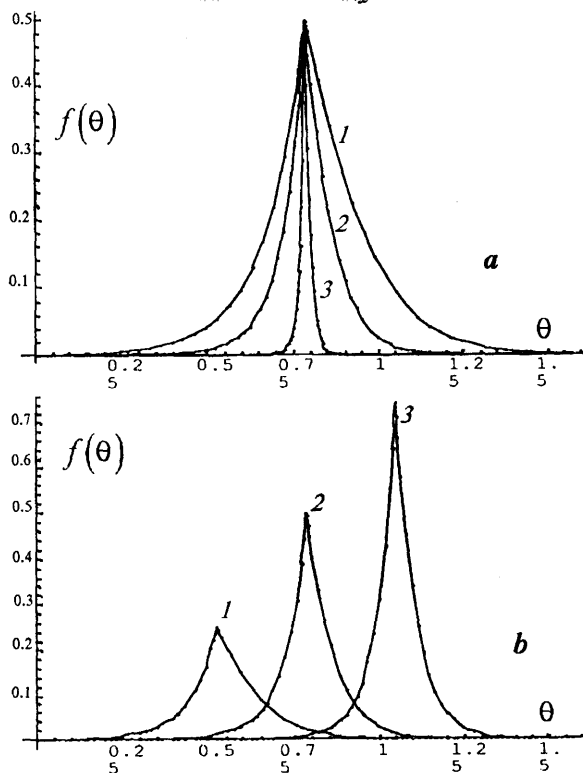


Рис. 5. Вигляд нормованої діаграми спрямованості перехідного випромінення модульованого електронного пучка у періодично неоднорідній плазмі: a — $\theta_0 = \pi/4$; $1 - kL = 5$, $2 - kL = 10$, $3 - kL = 50$; b — $kL = 10$; $1 - \theta_0 = \pi/6$, $2 - \theta_0 = \pi/4$, $3 - \theta_0 = \pi/3$.

ронного пучка, що проходить крізь обмежений неоднорідний шар холодної ізотропної плазми паралельно градієнту її концентрації. Частота модуляції пучка вважається значно більшою від максимальної електронної ленгмюрівської частоти плазмового шару. За цієї умови задачу можна розв'язувати методом послідовних наближень за малим параметром, роль якого грає, по суті, концентрація плазми. Розв'язок у нульовому наближенні описує електромагнітне поле модульованого електронного пучка в однорідному середовищі, розв'язок у першому наближенні — розсіювання цього поля на неоднорідностях, тобто перехідне випромінення. Виявляється, що випромінення під певним кутом до напрямку руху пучка визначається цілком певною складовою просторового спектра плазмової неоднорідності. Таким чином, виміривши випромінення під різними кутами, можна отримати інформацію про деяку ділянку просторового спектра плазмової неоднорідності. Якщо електронний пучок є релятивістським, а концентрація плазми мало змінюється по довжині випромінюваної хвилі, то в цю ділянку потрапляє практично весь спектр, тобто з'являється можливість за перехідним випроміненням відновити профіль концентрації плазми.

Оскільки натурний експеримент для перевірки запропонованого методу діагностики здійснити важко, було виконано його чисельне моделювання [48]: чисельно розраховувалося перехідне випромінення модульованого електронного пучка в плазмі з довільним профілем концентрації, а потім до результатів розрахунку застосовувався запропонований у [47] метод діагностики, і була зроблена спроба відтворити закладений у розрахунок профіль концентрації. Збіг початкового і відновленого профілів можна вважати задовільним.

Слід, однак, зазначити, що діагностика плазмових утворень за перехідним випроміненням модульованого електронного пучка з технічної точки зору є не дуже вдалою, оскільки вона вимагає вимірювання перехідного випромінення вперед та назад під різноманітними кутами до осі пучка. Тому в праці [49] було запропоновано використовувати для діагностики перехідне випромінення, збуджуване коротким зарядженим згустком, що має широкий спектр. Виявилось, що вимірювання часового ходу випромінюваного сигналу (точніше, високочастотної складової його спектра) під деяким фіксованим кутом до напрямку руху згустка також за певних умов дає можливість реконструювати профіль концентрації плазми. Тут можна прослідкувати певну аналогію з надширококутковою радіолокацією, коли вимірювання відбитого сигналу з широким

спектром також дає змогу повністю чи частково реконструювати форму розсіюючого об'єкта. На відміну від [48], в [49] враховано також наявність позовжнього магнітного поля. Про його величину також можна судити за перехідним випроміненням, вимірявши окремо його p - та s - поляризовані складові.

Як показують оцінки, зроблені в [49], для здійснення діагностики плазмових неоднорідностей необхідно вимірювати перехідне випромінення вперед, оскільки для релятивістських згустків випромінення назад значно слабше [29]. Але в багатьох випадках зручніше вимірювати випромінення назад (подібно до того, як це робиться в радіолокації). В [50] було запропоновано метод діагностики плазмових утворень за низькочастотною (резонансною) складовою випромінення назад. Таке випромінення під невеликими кутами до швидкості згустка несе інформацію про локальний градієнт концентрації i , отже, дозволяє відновити "видиму частину" профілю концентрації (або, як прийнято говорити в надширокосмуговій радіолокації, профільну функцію). Показано також, що максимумам концентрації будуть відповідати локальні максимуми у спектрі випромінення.

Висновки

Огляд праць, присвячених можливості перехідного випромінення модульованих електронних пучків в умовах активних плазмово-пу-

чкових експериментів у іоносфері, дозволяє зробити такі висновки.

1. Існує цілий ряд можливих сценаріїв виникнення цього типу випромінення, що визначається частотами модуляції пучка та типом плазмової неоднорідності, на якій воно відбувається. Вказані неоднорідності можуть бути зв'язані з наявністю космічного апарата та електронного пучка або існувати незалежно від них. Виконані оцінки показують, що в усіх розглянутих випадках величина перехідного випромінення для типових умов ракетних та супутникових експериментів може бути цілком достатньою для його спостереження.

2. Існує ряд фізичних механізмів, що можуть призводити до збільшення перехідного випромінення в згаданих умовах. До них належать, зокрема:

- збудження власних коливань обмеженого плазмового утворення;
- збудження невласних (бічних) хвиль на межі вакуум—плазма;
- збудження коливань в області локального плазмового резонансу слабконеоднорідної плазми;
- виконання умов просторового резонансу в періодично неоднорідній плазмі.

3. Перехідне випромінення модульованих електронних пучків та електронних згустків може бути використане для діагностики неоднорідних плазмових утворень в іоносфері та космосі.

1. Искусственные пучки частиц в космической плазме I Под ред. Б. Гранналя. М.: Мир, 1985.
2. Оравский В. Н., Мишин Е. В., Ружин Ю. Я. Искусственная инжекция энергичных частиц в околосолнечном космическом пространстве // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли.— М., 1989.—С. 77—86.
3. Оравский В. Н., Ружин Ю. Я., Докукин В. С., Волокитина А. С. Проект АПЭКС // Проект АПЭКС. Научные задачи, моделирование, методика и техника проведения эксперимента.— М.: Наука, 1992.— С. 6—16.
4. Пулинец С. А. О динамике излучения в свистовом диапазоне частот в эксперименте // "Физика ионосферы и магнитосферы".— М.: Наука, 1978.— С. 144—149.
5. Ижовкина Н. К., Пулинец С. А., Трушкина Е. П. Сравнение рассчитанных и измеренных спектров свистов для эксперимента "АРАКС" // Космические исследования.— 1986.—Т. 24, № 1.—С. 139—142.
6. Грингауз К. И., Ижовкина И. И., Пулинец С. А., Федоров В. А., Шютте Н. М. О механизме излучения на плазменной частоте в эксперименте с электронными пучками в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия.— 1989.— Т. 29.— № 4.— С. 659—661.
7. Rothkaehl H., K Jos Z., Dokukin V. S., Triska P. Remote spacecraft observations of waves excited by the pulse electron beam injected into ionosphere // Adv. Space Res.—1995.— Vol. 15.—N 12.—P. (12)25—(12)28.
8. Рогашкова А. И. Критерии пучково-плазменного разряда без магнитного поля // Препринт № 26 (353) ИРЭ АН СССР.— М., 1982.— 28 с.
9. Мишин Е. В., Ружин Ю. Я., Телегин В. А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой.— М.: Гидрометеиздат, 1989.
10. Волокитин А. С., Лизунов Г. В. Взаимодействие поперечно-ограниченного электронного пучка с неограниченной плазмой // Физика плазмы.— 1993.— Т. 19.— № 6.— С. 723—731.
11. Litzunov G. V. Generation of Bernstein modes in space and laboratory plasmas by injection of an electron beam II J. Plasma Physics.— 1997.—Vol. 57.— Part 2.— P. 387—401.
12. Федоров В. А. Механизм затухания плазменных колебаний на начальной стадии инжекции электронных импульсов с космического аппарата в ионосфере в активных экспериментах // Геомагнетизм и аэрномия.— 1984.— Т. 24.— № 2.— С. 205—210.
13. Lavergnat J., Lehner T. Low frequency radiation characteristics of a modulated electron beam in a magnetized plasma II IEEE Trans.— 1984.— Vol. AP-32.— N 2.— P. 177—181.
14. Ohnuki S., Adachi S. Radiation of electromagnetic waves from an electron beam antenna in an ionosphere II Radio Science.— 1984.— Vol. 19.— N 3.— P. 925—929.
15. Коцаренко Н. Я., Лизунов Г. В., Силивра А. А. Излучение электромагнитных волн модулированным электронным пучком, инжектируемым в ионосферу вдоль магнитного поля // Космические исследования.— 1988.— Т. 26.— № 6.— С. 874—879.
16. Рогашкова А. И. Возбуждение волн в неоднородной изотропной плазме модулированным электронным пу-

- чком// Радиотехн. и электроника.— 1980.— Т. 25.— № 5.— С. 1042—1050.
17. Балакирев В. А., Сидельников Г. Л. Переходное излучение модулированных электронных пучков в неоднородной плазме.— Харьков: ХФТИ, 1994.— 104 с.
 18. Балакирев В. А., Буц В. А., Курилко В. И. Переходное излучение модулированного тока на сферическом плазменном слое // Журн. техн. физ.—1976.— Т. 46.— № 3.— С. 477—483.
 19. Анісімов І. А., Кельник А. И., Котляров І. Ю., Левитський С. М., Стефановський Д. Г. Переходное излучение модулированного электронного пучка в неоднородной космической плазме // Проект АПЭКС. Научные задачи, моделирование, методика и техника проведения эксперимента.— М.: Наука, 1991.— С. 99—108.
 20. Анісімов І. А., Левитський С. М. О возможности наблюдения переходного излучения в активных плазменно-пучковых экспериментах в верхней атмосфере и космосе // Физика плазмы.— 1994.— Т. 20.— № 9.— С. 824—827.
 21. Анісімов І. О., Левитський С. М. Використання електронних пучків як випромінювачів радіохвиль в іоносфері Землі // Наукомісткі технології подвійного призначення. Тези доповідей наукової конференції.— Київ, 1994.—Т. 1.—С 194—195.
 22. Ораевский В. Н., Ружин Ю. Я., Докукин В. С. Динамика потенциала объекта с инжектором электронов и возможности его контроля // Проект АПЭКС: научные задачи, моделирование, методика и техника проведения эксперимента.— М.: Наука, 1992.— С. 29—40.
 23. Березина Г. П., Файнберг Я. Б., Березин А. К., Назаренко О. К. Об использовании модулированных электронных пучков для переноса электромагнитных волн через плотную плазму и излучения из нее // Физика плазмы.— 1994.—Т. 20.— № 9.— С. 828—835.
 24. Филипп Н. Д. Рассеяние радиоволн изотропной ионосферой.— Кишинев: Штиница, 1974.— 188 с.
 25. Левитський С. М., Бурякин Ю. И. Некоторые особенности излучения микроволн из плазмы газового барьера // Укр. физ. журн.— 1972.— Т. 17.— № 7.— С. 1198—1201.
 26. Анісімов І. А., Левитський С. М., Опанасенко А. В., Романюк Л. И. Экспериментальное обнаружение просветления плазменного волнового барьера с помощью электронного пучка // Журнал технической физики.— 1991.— Т. 61. Вып. 3.— С. 59—63.
 27. Анісімов І. О., Борисов О. А. Про поперечний розмір зони формування перехідного випромінювання заряду, що рухається // Вісник Київського університету. Фізико-математичні науки.— Київ, 1997. Вип.1.— С. 357—365.
 28. Kovalyov Yu. E., Anisimov I. O. Transitional radiation of the stripped modulated electron beam that falls obliquely on the plasma border II Kyiv Shevchenko University. 5th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts.— Kyiv, 1998.— P. 55.
 29. Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории).— М.: Наука, 1984.—360 с.
 30. Ерохин Н. С., Моисеев С. С., Назаренко Л. А. О некоторых свойствах переходного излучения в слабонеоднородной и нестационарной плазме// ЖЭТФ.— 1975.— Т. 69.—№1(7).—С. 131—141.
 31. Anisimov I. O., Kelyuk O. I. On the possibility to observe the whistler modes transitional radiation in the beam-plasma experiments in the ionosphere II 1996 International Conference on Plasma Physics.— Nagoya, Japan, 1996.— Proceedings.— Vol. 1.— P. 42—45.
 32. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме.— М.: Наука, 1967.
 33. Анісімов І. А., Стефановський Д. Г. Трансформация волн пространственного заряда в электромагнитные волны на скачке концентрации анизотропной плазмы // Радиотехника и электроника.— 1991.— Т. 36.— Вып. 1.—С. 109—117.
 34. Гинзбург В. Л., Рухадзе А. А. Волны в магнитоактивной плазме., М.: Наука, 1975.
 35. Анісімов І. А., Зубарев А. А., Котляров І. Ю., Левитський С. М. Переходное излучение модулированного потока электронов в слабонеоднородной плазме // Изв. вузов. Радиофизика.—1994.—Т. 37.— № 2.— С. 194—199.
 36. Анісімов І. О., Котляров І. Ю., Левитський С. М., Опанасенко О. В., Палець Д. Б., Романюк Л. І. Дослідження просвітлення плазмових бар'єрів для електромагнітних хвиль за допомогою електронних пучків. 2. Еволюція хвиль просторового заряду в бар'єрі // Український фізичний журнал.— 1996.— Т. 41.— № 2.— С 164—170.
 37. Анісімов І. А., Котляров І. Ю. Излучение электромагнитных волн аксиально-симметричным модулированным электронным пучком в неоднородной плазме // Радиотехника и электроника.— 1987.— Т. 32.— Вып. 3.— С. 601—605.
 38. Анісімов І. О., Кельник О. І. Перехідне випромінювання модульованого циліндричного згустка заряду в слабонеоднорідній ізотропній плазмі // Вісник Київського університету. Фізико-математичні науки.— 1992.— Вип. 4.— С 69—73.
 39. Анісімов І. А., Стефановський Д. Г. Возбуждение электромагнитных волн модулированным электронным потоком в слабонеоднородной изотропной плазме // Украинский физический журнал.— 1988.— Т. 33.— № 1.— С. 38—40.
 40. Borisov O. A., Anisimov I. O. Deformation of the non-uniform plasma concentration profile due to the modulated electron beam II Kyiv Shevchenko University. 5th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts.— Kyiv, 1998.— P. 56.
 41. Анісімов І. А., Левитський С. М. Излучение модулированного электронного потока в плазме с непрямолинейным профилем концентрации // Украинский физический журнал.—1989.—Т. 34.—№9.—С. 1336—1342.
 42. Балакирев В. А., Буц В. А. Взаимодействие релятивистского электронного пучка с ионно-звуковой волной изотропной плазмы // Изв. вузов. Радиофизика.— 1983.— Т. 26.— №12.— С. 1511—1529.
 43. Анісімов І. А., Левитський С. М. Переходное рассеяние акустической волны в электромагнитную на модулированном электронном пучке в плазме // II Всесоюзный научный семинар "Взаимодействие акустических волн с плазмой", г. Мегри. Тезисы докладов.— Ереван, 1991.—С. 60—62.
 44. Анісімов І. О. Перехідне випромінювання модульованого електронного пучка як задача лінійної фільтрації // Україна: люди, суспільство, природа. Тези доповідей IV щорічної наукової конференції НАУКМА.— Київ, 1998.—С 195—196.
 45. Ермаков Е. Н., Трахтенгерц В. Ю. О переходном механизме КВ и УКВ радиоизлучения в полярной ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация.—1981.— Т. 21.— № 1.— С. 82—86.
 46. Анісімов І. А. Излучение модулированного электронного пучка в случайно-неоднородной плазме // Геомагнетизм и аэронавигация.— 1995.— Т. 35.— № 6.— С. 40—45.
 47. Анісімов І. О. Перехідне випромінювання модульованого електронного пучка як засіб діагностики плазмових утворень //Український фізичний журнал.—1996.— Т. 41.— № 9.— С 798—801.
 48. Blazhko I. A., Anisimov I. O. Plasma objects diagnostics using transitional radiation of the modulated electron beam: numerical simulation II Kyiv Shevchenko University. 5th

- Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts.— Kyiv, 1998.— P. 57.
49. *Анісімов І. О., Любич К. І.* Перехідне випромінювання зарядженого згустка як засіб діагностики плазмових утворень // Український фізичний журнал.—1997.— Т. 42.—№8.—С. 959—966.
50. *Anisimov I. O., Lyubich K. I.* Plasma objects diagnostics using transitional radiation of the electron bunches // The Centenary of Electron. Proceedings of the International Conference / Ed. by A. Zvilopulo, Yu. Azhniuk, [†] Bandurina.— Uzhgorod, 1997.— P. 71—76.

Anisimov I. O.

TRANSITIONAL RADIATION AS A POSSIBLE MECHANISM
OF THE MODULATED ELECTRON BEAMS
RADIOEMISSION IN THE ACTIVE IONOSPHERIC
EXPERIMENTS

The works devoted to the transitional radiation of the modulated electron beams injected from the spacecraft board into the ionospheric plasma are reviewed in the article. The possibility of the inhomogeneous plasma objects diagnostics using transitional radiation of the modulated electron beams and electron bunches is also discussed.