

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,

ЛЕВЧУК Ірина Павлівна

УДК 533.9.01

**ЗБУДЖЕННЯ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ У
НЕРІВНОВАЖНІЙ ПЛАЗМІ**

01.04.08 – фізика плазми

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків — 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна та в Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, **Маслов Василь Іванович**, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Анісімов Ігор Олексійович**, Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, декан факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем;

доктор фізико-математичних наук, професор **Куклін Володимир Михайлович**, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України, завідувач кафедри штучного інтелекту та програмного забезпечення факультету комп'ютерних наук.

Захист відбудеться «27» вересня 2019 року о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр. Академіка Курчатова, 31, аудиторія 313.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розіслано «___» серпня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д.64.051.12



А.Г. Гах

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертаційна робота присвячена проблемам, пов'язаним зі збудженням несинусоїдальних хвильових збурень в плазмі, зокрема, несинусоїдального кільватерного поля в плазмі та з його використанням для фокусування та прискорення згустків релятивістських електронів. Дотепер збудження фокусуючих кільватерних полів, що задовольняють сучасним вимогам, у плазмі та інтенсивне однорідне фокусування згустків релятивістських електронів кільватерними полями в плазмі недостатньо вивчені. Тим більше, що плазма в експерименті сильно неоднорідна і нестационарна. В багатьох умовах збудження кільватерних полів у плазмі та фокусування згустків релятивістських електронів доводиться здійснювати в нерезонансних умовах. Тому необхідні аналітичні дослідження і комп'ютерне моделювання однорідного фокусування згустків релятивістських електронів кільватерними полями, що збуджуються в плазмі, та дослідження щодо збудження кільватерних полів у плазмі і щодо фокусування згустків релятивістських електронів в нерезонансних умовах.

Оскільки для прискорення необхідне велике кільватерне поле, то його доводиться збуджувати послідовністю згустків. Тому необхідні теоретичні дослідження збудження кільватерного поля в плазмі послідовністю згустків в нелінійному режимі. Також необхідне дослідження умов, за яких відбуватиметься однорідне фокусування послідовності згустків релятивістських електронів.

Коефіцієнт трансформації — важлива в кільватерних методах прискорення заряджених частинок величина. Вона характеризує, до якої енергії можуть бути прискорені електрони послідовністю електронних згустків з даною енергією. Розглядається коефіцієнт трансформації, який визначається як відношення $TE = E_2/E_1$ кільватерного поля E_2 , яке збуджується в плазмі послідовністю електронних згустків, до поля E_1 , в якому електронний згусток гальмується. Оскільки теорема Вільсона стверджує, що в звичайних умовах, коли згустки рухаються один за одним, $TE \leq 2$, то необхідний пошук умов підвищення коефіцієнта трансформації.

У сепараторі радіоактивних відходів використовується схрещена конфігурація радіального електричного і поздовжнього магнітного полів. Відомо, що в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях збуджується вихрова турбулентність, яка погіршує сепараційні властивості установки. Необхідні теоретичні дослідження умов пригнічення вихрової турбулентності в сепараторі радіоактивних відходів.

В експериментах по взаємодії лазерного імпульсу з фольгою за певних умов спостерігається формування поблизу фольги солітонного збурення великої амплітуди. Необхідні теоретичні дослідження властивостей цього солітонного збурення великої амплітуди та механізму його збудження.

Дослідження перелічених вище питань становить актуальну задачу розвитку теоретичних та практичних задач плазмової електроніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що увійшли до дисертаційної роботи, були проведені відповідно до державних

науково-дослідних робіт, які виконувались та виконуються в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна МОН України і у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут»: «Дослідження розділення іонів в плазмі, що обертається в схрещених електричному і магнітному полях, дослідження процесів модифікації матеріалів при дії імпульсного акустичного випромінювання і потужних потоків частинок» (номер державної реєстрації 0111U009561); «Експериментальні та теоретичні дослідження процесів взаємодії потоків частинок з речовиною» (номер державної реєстрації 0111U007953); «Інженерно-фізичні розробки вакуумно-плазмового технологічного комплексу та приладу експресних вимірів складу речовини» (номер державної реєстрації 0115U000495), «Фізичні засади створення та використання сучасних матеріалів у плазмово-технологічних процесах» (номер державної реєстрації 0115U000471), «Індуктовані електрослабкими взаємодіями рідкісні процеси і розпади та структурні ефекти в сильних і електромагнітних взаємодіях» (номер державної реєстрації 0118U002031).

Рівень участі автора дисертації в роботах – виконавець.

Мета й задачі дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є:

- визначення умов збудження кільватерних полів у плазмі, що забезпечують однорідне фокусування послідовності згустків релятивістських електронів;
- пошук умов підвищення коефіцієнта трансформації;
- визначення властивостей солітонного збурення великої амплітуди та механізму його збудження поблизу фольги при взаємодії з нею лазерного імпульсу;
- визначення умов пригнічення вихрової турбулентності в сепараторі радіоактивних відходів.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести наступні дослідження:

- 1) провести теоретичний аналіз збудження кільватерних полів у плазмі за допомогою різних послідовностей згустків заряджених частинок;
- 2) дослідити можливі способи підвищення коефіцієнта трансформації з метою збільшення темпу прискорення;
- 3) визначити умови однорідного фокусування для послідовності релятивістських електронних згустків і для випадку суцільного пучка;
- 4) провести аналіз за допомогою числового моделювання і знайти співвідношення кільватерного фокусування до самофокусування в залежності від форми згустку при збудженні кільватерного поля;
- 5) виконати аналітичне дослідження збудження солітону нестационарним електричним полем;
- 6) теоретично дослідити властивості і збудження вихрових збурень, що збуджуються в циліндричній радіально неоднорідній плазмі в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях;
- 7) аналітично отримано дисперсійне рівняння, що описує можливий розвиток нестійкості збудження вихрової турбулентності в циліндричній плазмі сепаратора в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях з урахуванням поздовжньої неоднорідності, скінченного часу виходу з системи

електронів та іонів плазми, скінченного часу перезарядки іонів та скінченного часу оновлення електронів.

Об'єкт дослідження — кильватерні поля в плазмі, збуджені резонансними і нерезонансними послідовностями релятивістських електронних згустків; процеси збудження вихрових збурень в циліндричній радіально неоднорідній плазмі в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях; збудження солітонного горба електричного потенціалу великої амплітуди, що рухається з тепловою швидкістю електронів плазми поблизу фольги при взаємодії з нею лазерного імпульсу.

Предмет дослідження — фізичні процеси збудження інтенсивних однорідно фокусуючих хвиль густини заряду згустками і послідовностями згустків заряджених частинок у плазмі, а також механізми синхронізації частот при резонансному збудженні кильватерного поля нерезонансною послідовністю згустків релятивістських електронів, умови пригнічення вихрової турбулентності в сепараторі радіоактивних відходів, властивості і механізм збудження солітонного збурення поблизу фольги при взаємодії з нею лазерного імпульсу.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалося чисельне моделювання, яке проводилося в рамках гідродинамічної і кінетичної моделей опису плазми, а також методи математичної фізики.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній вперше:

1. За допомогою числового моделювання та аналітично показано, що для однакового й однорідного фокусування послідовності довгих релятивістських електронних згустків в кильватерній плазмовій лінзі необхідно, щоб довжина кожного згустку була кратна половині довжини кильватерної хвилі $\xi_0 = q(\lambda/2)$, $q=1,2,\dots$ а заряд 1-го згустку був в два рази менше зарядів всіх інших згустків. Проміжок між згустками повинен бути кратним довжині хвилі $\delta\xi = p\lambda$, $p=1,2,\dots$. Аналітично і за допомогою числового моделювання показано, що тільки 1-й згусток знаходиться в кінцевому поздовжньому кильватерному полі $E_z \neq 0$. Інші згустки знаходяться в нульовому поздовжньому кильватерному полі $E_z = 0$. Отже, 1-й згусток обмінюється енергією з кильватерним полем. Наступні згустки не обмінюються енергією з кильватерним полем. Радіальна кильватера сила F_r в областях розташування згустків приблизно постійна уздовж згустків.

2. Аналітично і за допомогою числового моделювання показано, що всі короткі згустки послідовності можуть фокусуватися однаково і однорідно. Вперше аналітично і числовим моделюванням отримані два типи лінз для коротких згустків, що забезпечують таке фокусування.

3. За допомогою числового моделювання показано, що вздовж усього дуже довгого однорідного пучка фокусуюче поле однакове (однорідне), якщо його передній фронт являє собою сходинок половинної густини заряду довжиною в половину довжини хвилі. Фокусуюче поле досягає свого максимального значення на короткому просторовому інтервалі, що збігається з переднім фронтом пучка.

4. Проведено аналіз за допомогою числового моделювання і знайдена залежність співвідношень кільватерного фокусування до самофокусування в залежності від форми згустку при збудженні ним кільватерного поля. Показано, що однорідне фокусування довгого згустку з передвісником визначається тільки самофокусуванням.

5. За допомогою числового моделювання при збудженні кільватерного поля довгою послідовністю коротких гаусівських згустків релятивістських електронів показано, що коефіцієнт трансформації, як відношення прискорюючого поля до гальмуючого поля, зростає з ростом числа згустків послідовності при відстані між згустками, рівній сумі довжини збуджуваної хвилі і ширини згустку на напіввисоті, і при розташуванні згустків через півтори довжини хвилі.

6. Аналітично досліджено збудження нестационарним електричним полем солітону, який рухається з тепловою швидкістю електронів плазми поблизу фольги при взаємодії з нею лазерного імпульсу.

7. Аналітично отримано дисперсійне рівняння, що описує можливий розвиток нестійкості збудження вихрової турбулентності в циліндричній плазмі сепаратора в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях з урахуванням поздовжньої неоднорідності, скінченного часу виходу з системи електронів та іонів плазми, скінченного часу перезарядки іонів та скінченного часу оновлення електронів.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів. Достовірність і обґрунтованість наукових положень і висновків, які представлені в дисертаційній роботі, базується на використанні традиційних і апробованих методів фізики, методів комп'ютерного обчислювання, на порівнянні результатів комп'ютерного моделювання з результатами експериментів, з літературними даними, а також на апробації результатів роботи на наукових семінарах і конференціях, публікаціях в наукових журналах. Висновки дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими, оскільки отримані в ній наукові результати мають чітку та наочну фізичну інтерпретацію. Основні положення та висновки дисертаційної роботи добре відповідають змісту отриманих результатів та є достатньо обґрунтованими.

Практичне значення одержаних результатів.

Теоретичні дослідження, проведені в дисертаційній роботі, необхідні на практиці для збільшення темпів прискорення в прискорювачах електронів, що дозволить значно зменшити не тільки розміри установок, але і їх вартість, а значить і доступність, можна буде проводити дослідження не тільки у великих дослідних центрах.

У роботі показано можливість поліпшення однорідності фокусування згустків електронів, що може бути використано при фокусуванні в колайдерах за рахунок використання збуджуваних поперечних кільватерних полів.

За допомогою числового моделювання проведені дослідження з метою пояснити результати експериментів, виконаних в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України по збудженню кільватерного поля довгою послідовністю коротких гаусівських згустків

релятивістських електронів і прискоренню електронних згустків з малим зарядом у збудженому полі.

Отримані результати можуть бути застосовані в науково-дослідних центрах: Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, в Лабораторії лінійних прискорювачів Університету Парижа (Орсе, Франція), в Національній лабораторії Фраскаті (Рим, Італія), на Німецькому електронному синхротроні (Desy), в університеті Оксфорда, Європейському центрі ядерних досліджень (CERN, Женева), в рамках програми Horizon 2020 та ін., в яких проводяться експерименти щодо кільватерного прискорення.

На ефективність і якість роботи сепаратора частинок по масам можуть істотно вплинути нестійкості. Ці нестійкості збуджуються в інших пристроях в аналогічних умовах, в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях. Тому аналітично отримано дисперсійне рівняння, що описує можливий розвиток нестійкості збудження вихрової турбулентності в циліндричній плазмі сепаратора в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях. Це дисперсійне рівняння отримано з урахуванням скінченної довжини сепаратора, скінченного часу виходу із сепаратора електронів та іонів плазми, скінченного часу перезарядки іонів та скінченного часу оновлення електронів.

Особистий внесок здобувача.

Всі результати, що увійшли до дисертації, здобуто за особистої участі автора.

У роботах [1, 3-9, 11a-12] - визначення проблеми і постановка необхідних для її вирішення завдань, аналіз літературних джерел, проведення числового моделювання, аналіз результатів, підготовка до публікацій матеріалів проведених досліджень. У роботах [2,10,11б] - постановка проблеми та визначення необхідних для її вирішення завдань, аналіз літературних джерел, проведення аналітичного обчислення, підготовка до публікацій матеріалів проведених досліджень.

Апробація результатів дисертації.

Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на наступних семінарах, школах і конференціях: 3rd International Conference. “Quantum Electrodynamics and Statistical Physics” (QEDSP2011), Kharkov, Ukraine. 29 August — 02 September, (2011); XXII International Workshop on Charged Particle Accelerators (IWCPA2011), Alushta, Ukraine, September 22-28 (2011); X Conference Physics of High Energy, Nuclear Physics and Accelerators, Kharkov, Ukraine, 27 Feb 2 March (2012); Int. Conf. & School on Plasma Phys. & Contr. Fus. Alushta, Ukraine, Sept. 17-22 (2012); 2nd International Students Scientific Conference «Academic and scientific challenges of diverse fields of knowledge in the 21st century», Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine(2013); XII Международный семинар «Плазменная электроника и новые методы ускорения», Харьков, Украина, август (2013); International Workshop on Charge Particle Accelerators (IWCPA 2013) Alushta, Ukraine, Sept 8-14(2013); Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу, Київ, (2013); 11-я Курчатовская молодежная научная школа, Российская Федерация, (2013); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop "Nano- and micro-sized structures in plasmas", Kharkiv, Ukraine, September 15-18 (2014); XII Конференция по физике высоких энергий, ядерной

фізики і ускорителям, Харків, Україна, Март 17 – 21 (2014); XIII International Conference “Plasma electronics and new methods of acceleration”, Kharkov, Ukraine, August 24-28 (2015); XXIV International Workshop on Charged Particle Accelerators (IWCPA 2015), Kharkiv, Ukraine, September 21-25, (2015); Nineteenth international summer school on vacuum, electron and ion technologies, Sozopol, Bulgaria, September 21-25 (2015); International Young Scientists Forum on Applied Physics, Dnipropetrovsk, Ukraine, September 29 – October 2, (2015); IPAC'16, the Seventh International Particle Accelerator Conference, Busan, Korea, May 8 – 13, (2016).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 статей в спеціалізованих фахових наукових виданнях України [1-12], що задовольняють вимогам ДАК МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертаційна робота, 9 з яких входять до всесвітньої бази Scopus та 8 з яких входять до всесвітньої бази Web of Science; 13 робіт в збірниках наукових праць, в матеріалах та тезах доповідей на наукових конференціях, 10 з яких доповідались особисто.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 203 сторінки, з яких основний текст – 161 сторінка, робота містить 144 рисунка. Список використаних літературних джерел налічує 164 найменування на 19 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі роботи, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і темами. Сформульовано наукову новизну і практичне значення роботи та отриманих результатів. Відображено особистий внесок здобувача, апробацію її результати та публікації. Наведені дані про структуру та зміст дисертації.

У першому розділі дисертації наведено короткий огляд літератури з питань по темі дисертації, в якому відображено стан досліджень за новими методами прискорення заряджених частинок на теперішній час.

У підрозділі 1.1 розкрито більш детально формування прискорюючих полів та їхнє значення для світової спільноти, що показує наскільки дисертаційна робота є актуальною на теперішній час не тільки для фізичної спільноти, а також для всього людства.

Другий підрозділ містить стислий огляд коду LCODE, за допомогою якого проводилося чисельне моделювання. Всі дані в програмі LCODE представлені в безрозмірних величинах. Одиниці виміру визначаються універсальними сталими і початковою густиною плазми n_0 . Час нормований на ω_{pe}^{-1} , де $\omega_{pe} = (4\pi n_0 e^2 / m)^{1/2}$ – електронна плазмова частота, відстань нормована на c / ω_{pe} , густина нормована на n_0 , всі поля нормовані на $\sqrt{4\pi n_0 m c^2}$, потенціал кильватерного поля нормований на $m c^2 / e$, імпульс пучка і імпульс плазми нормовані на $m c$, де c - швидкістю світла.

У другому розділі дисертації розглядається кільватерна плазмова лінза, що забезпечує однакове та однорідне фокусування послідовності електронних згустків у плазмі.

У підрозділі 2. 1 запропонований та аналітично описаний механізм фокусування плазмовим кільватерним полем релятивістських електронних згустків. Розглянута динаміка збудження кільватерного поля в плазмі резонансною послідовністю згустків. Показано, що за певних умов: співвідношення довжини згустків до довжини збуджуваної хвилі в плазмі, заряду першого згустку, відстані між згустками, продольного розподілу густини згустків (тобто форми згустка) збуджуються кільватерні поля в плазмі, в яких відбувається однакове та однорідне фокусування послідовності згустків у плазмі (рис. 1).

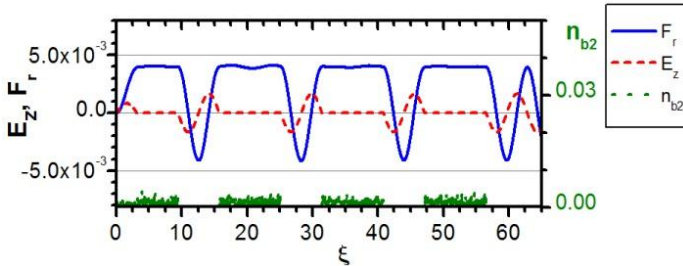


Рис. 1. Поздовжні розподілення густини n_{b2} згустків при $r=r_b$ (зелений), поздовжнього кільватерного поля E_z (червоний), радіальної кільватерної сили F_r (синій), що збуджується послідовністю з 4 згустків. При цьому перший згусток у вигляді сходинок.

У підрозділі 2. 2 проведено вивчення кільватерної плазмової лінзи для випадку коротких релятивістських електронних згустків $\Delta\xi_b < \lambda/2$. Показано, що існує два види лінз для послідовності коротких згустків. Досліджено за допомогою числового моделювання фокусуючі поля як для послідовності коротких згустків, так і для випадку суцільного пучка.

У підрозділі 2. 3 для різних параметрів експерименту наведені результати числового моделювання і знайдено співвідношення кільватерного фокусування до самофокусування в залежності від форми згустку при збудженні кільватерного поля.

У підрозділі 2. 4 досліджено фокусування послідовності згустків релятивістських електронів кільватерним полем як для резонансного $\omega_m = \omega_{pe}$ (частота руху згустків збігається з електронною плазмовою частотою), так і для нерезонансного випадків $\omega_{pe} > \omega_m$. На рис. 2 а наведено, що фокусування в резонансному випадку є сильно неоднорідним. А в випадку нерезонансної кільватерної плазмової лінзи для короткої послідовності однакових згустків релятивістських електронів, довжина яких менша половини довжини хвилі $\Delta\xi_b < \lambda/2$, існує набір оптимальних параметрів, за яких вони всі знаходяться в фокусуючих кільватерних полях (рис.2b).

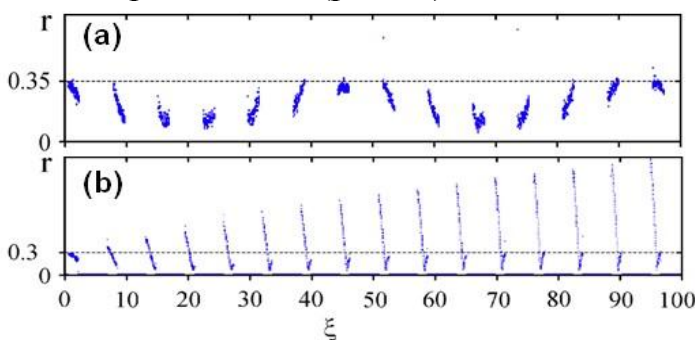


Рис. 2. Поздовжній розподіл радіусів r_b прямокутних згустків $\Delta\xi_b = \lambda/4$ при густині плазми $n_e = 1.35n_{res}$, $I_b = 10^{-3}$ після їх фокусування на відстані $z = 50$ см від межі інжекції для випадку послідовності: а) – резонансної; б)-нерезонансної.

Для визначення оптимальних параметрів використовуються дві умови: 1- щоб всі згустки послідовності N_b поміщалися на довжині одного биття треба $0 < \omega_{pe} - \omega_m < \omega_{cr}$. ω_{cr} – деяка критична частота, пов'язана з N_b . При цьому, 2- щоб всі електрони всіх згустків перебували в фокусуючих кільватерних полях, треба $\Delta\xi_b < \Delta\xi_{cr}$. У разі довгої послідовності згустків скінченної довжини в нерезонансному випадку показано, що фокусуються всі згустки за винятком тільки тих згустків, які знаходяться на фронтах биттів, де вони майже не фокусуються. Була розглянута також довга профільована за лінійним законом послідовність коротких гауссівських згустків, проміжок між якими дорівнює довжині хвилі. Показано, що в цьому випадку всі згустки знаходяться в максимумах фокусуючого поля і при цьому слабо гальмуються, так як вони розташовані в нульовому гальмуючому полі від попередніх згустків. Також була розглянута довга послідовність коротких згустків з передвісником, яка профільована за лінійним законом як уздовж послідовності, так і вздовж кожного згустку. Показано, що вони знаходяться в максимальних фокусуючих полях.

Третій розділ присвячений дослідженню умов збільшення коефіцієнта трансформації при збудженні кільватерного поля довгою послідовністю електронних згустків у плазмі.

У *підрозділі 3.1* наведено результати досліджень числового моделювання по збільшенню коефіцієнта трансформації при збудженні нелінійного кільватерного поля в плазмі профільованою послідовністю електронних згустків з лінійно наростаючою густиною. Було запропоновано заряди послідовності згустків та кожного згустку профілювати по довжині по лінійному закону, тоді заряди згустків відносились по відомому закону $1:3:5\dots$, тобто $Q_n = (2n-1)Q_1$. Показано, що коефіцієнт трансформації T_E може досягати великого значення як для різних довжин згустків $\Delta\xi_b = \lambda, 2\lambda\dots$, так і для різних відстаней між згустками. Важливо для збільшення T_E отримати однорідне гальмуюче поле вздовж згустків-драйверів, для того щоб усі електрони згустку повністю гальмувалися. З цією метою було використано перед послідовністю згустків передвісник малого заряду і отримано коефіцієнт трансформації на $30\div 50\%$ більший від того, який нині є максимально відомим $2\pi N$, де N – кількість згустків. Це майже ідеальний кільватерний прискорювач, так як можна досягти максимального T_E за умови повного гальмування драйверів в майже однакових полях (рис. 3, 4).

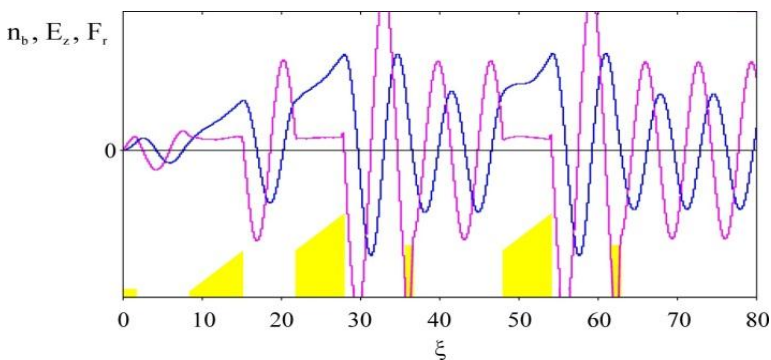


Рис. 3. Поздовжнє розподілення кільватерного електричного поля E_z (рожева крива), радіальної кільватерної сили F_r (синя), густини послідовності електронних згустків n_b (жовтий).

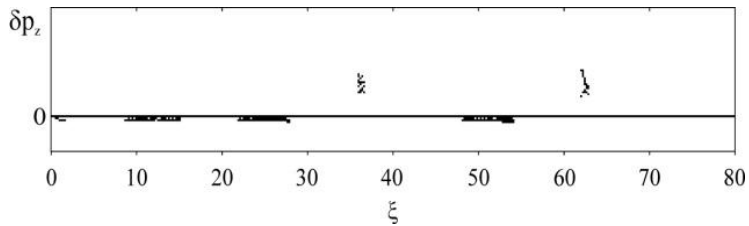


Рис. 4. Зміна поздовжнього імпульсу прискорених згустків і тих, що гальмуються δp_z . Два точкових прискорених згустки чергуються профільованими згустками-драйверами. δp_z нормований на $m_e c^2$

Таким чином можливо отримати велике значення T_E , але вздовж послідовності збільшується радіальна кільватерна сила F_r , яка може призвести до нестійкості. Було досліджено та з'ясовано, що стаціонарного режиму роботи прискорювача можливо досягти, якщо підібрати певні згустки, котрі прискорюються, та узгодити їх з певними згустками, котрі збуджують кільватерне поле, які будуть чергуватися з ними. Першим йде передвісник. За ним йде послідовність згустків, яка профільована за лінійним законом, як вздовж згустку, так і вздовж послідовності згустків. За цими згустками, які збуджують кільватерне поле, йде щільний згусток, який прискорюється. Амплітуда кільватерного поля зменшується після нього в конкретному розглянутому випадку в 2 рази. Потім згустки, які прискорюються, періодично чергуються згустками – трапеціями, котрі відновлюють амплітуду кільватерного поля після кожного щільного згустку, який прискорюється.

Перевагами данної схеми є не тільки однорідне гальмування, великий коефіцієнт трансформації $T_E \approx 2\pi N_{fr}$, великий струм прискорених згустків, а й однакова для усіх згустків, які збуджують кільватерне поле, фокусуюча сила в нелінійному випадку.

У *підрозділі 3.2* розглянуто коефіцієнт трансформації при взаємодії довгої послідовності електронних згустків з плазмою. Встановили, що профільована по заряду послідовність згустків забезпечує в нелінійному режимі коефіцієнт трансформації значно більший, ніж у лінійному режимі.

У *підрозділі 3.3* показано, що в разі лінійного профілювання зарядів послідовності згустків як уздовж згустків, так і вздовж послідовності зі згустком - передвісником досягається великий коефіцієнт трансформації. Результати числового моделювання можуть бути співвіднесені з аналітичними виразами, які отримані в даному підрозділі. У разі лінійного профілювання зарядів послідовності згустків як уздовж згустків, так і вздовж послідовності зі згустком - передвісником досягається великий коефіцієнт трансформації (рис.5). Великий коефіцієнт досягається за рахунок того, що згустки на ділянці послідовності, на якій їх заряд наростає, потрапляють в малі гальмівні поля. Показано, що на задній ділянці послідовності, на якій заряд згустків спадає, згустки автоматично потрапляють у великі прискорюючі поля (рис.6). Видно, що амплітуда кільватерного поля і коефіцієнт трансформації ростуть із зростанням числа згустків, які збуджують кільватерне поле. Розглянуто діапазон варіації параметрів, при яких коефіцієнт трансформації залишається великим. Числове моделювання показує, що коефіцієнт трансформації T_E і поле, яке прискорює, залишаються великими в разі варіації параметрів від $2\pi V_0/\omega_m = \lambda + \Delta\xi_b$

до $2\pi V_0/\omega_m = \lambda + \Delta\xi_b \pm \Delta\xi_b/2$. Однак в цих випадках гальмівні поля і їх просторові розподіли різні.

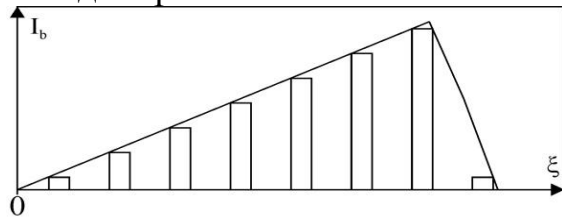


Рис. 5. Струм згустків з довжиною згустків $\xi_b = \lambda/2$, відстанню між згустками $\delta\xi = 1,5\lambda$, $q_1:q_2:q_3: \dots = 1:3:5: \dots$ при лінійному наростанні і різкому зменшенні з часом.

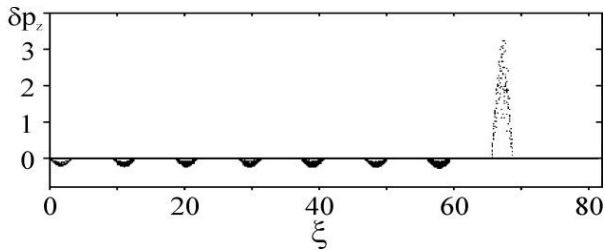


Рис. 6. Зміна поздовжнього імпульсу згустків δp_z при збудженні кільватерного поля.

У **четвертому розділі** дисертації розглядається проблема резонансного збудження кільватерного поля довгою послідовністю релятивістських електронних згустків. Знайдено причини, які можуть призводити до дефокусування згустків електронів. Показано що синхронізація частот здійснюється за рахунок самоочищення послідовності згустків при їх дефокусуванні. При цьому згустки йдуть за радіусом, бо знаходяться не в фазі з хвилею.

У *підрозділі 4.1* вивчені та за допомогою числового моделювання продемонстровано механізми, які призводять до дефокусування електронних згустків при збудженні кільватерного поля в плазмі. Одним з яких є різниця плазмової частоти та частоти, з якою рухаються згустки, що призводить до того, що відбувається їх зсув відносно хвилі і деякі з них потрапляють в області з великими величинами радіальної сили F_r . Також важливу роль відіграє скінченна довжина згустків $\Delta\xi_b$, оскільки навіть якщо їх задні фронти фокусуються, то передні фронти все ж дефокусуються. Показано, що дефокусування визначається також скінченним радіусом згустків $r_b \neq 0$. На дефокусування електронних згустків також впливає перекіс хвилі, котрий виникає тому, що компенсуючі електрони плазми залишають вісь. Більше того перекіс хвилі може відбуватися і за рахунок того, що при фокусуванні задніх фронтів згустків і дефокусуванні їх передніх фронтів самі згустки, що збуджують хвилю, перекошуються. Встановлено також, що навіть якщо згустки знаходяться в фокусуючих фазах, вони можуть за певних умов дефокусуватися при розширенні бетатронних коливань.

У *підрозділі 4.2* наведено результати числового моделювання зростання амплітуди кільватерного поля при повільному зростанні з часом густини плазми. Показано, що іонізація призводить до корегування резонансу, як при розвитку пучково-плазмового розряду. Також наведено результати числового моделювання для випадку збудження кільватерного поля, коли спочатку густина плазми n_{0e} більше, ніж резонансна $n_{0e} > n_{rez} (= \omega_m^2 m_e / 4\pi e^2)$ і густина плазми росте повільно з часом. Проведене моделювання показує на можливість використання такої системи, оскільки більший час знаходження згустків в фокусуючих фазах поля та більш тривала підтримка резонансу призводить до більшої амплітуди кільватерного поля.

У підрозділі 4.3 розглянуто розділення довгого згустку ($\ell_b \gg \lambda$, ℓ_b - довжина згустку, λ - довжина кільватерної хвилі) на послідовність коротких згустків, в залежності від його початкового профілю. Отримана послідовність коротких згустків призводить до збудження кільватерного поля. Оскільки розглядається релятивістський згусток у плазмі, то модуляція в першу чергу розвивається за рахунок радіальної сили F_r . Саме тому була розглянута осцилююча складова компоненти F_r кільватерного поля для різних профілів довгого згустку. Було досліджено кілька видів позовжнього розподілу заряду згустку: лінійне наростання заряду уздовж згустку, лінійне наростання заряду уздовж згустку з передвісником, нормальний розподіл (підпорядковується закону розподілу Гаусса) заряду, близький до гаусівського (по косинусу), прямокутний розподіл із крутими фронтами. Якщо форма довгого згустку близька до нормального розподілу з крутим заднім фронтом, то навіть без передвісника він створює монотонно наростаюче вздовж нього фокусуюче поле. Швидше за все довгий згусток трансформується в послідовність коротких згустків в разі прямокутного згустку з крутими фронтами.

П'ятий розділ присвячений розгляду збудження і властивостей солітону, що рухається з тепловою швидкістю електронів у плазмі поблизу фольги при взаємодії з нею лазерного імпульсу. Аналітично досліджено розвиток нестійкості збудження вихрової турбулентності в циліндричній плазмі зі схрещеною конфігурацією електричного і магнітного полів. Розглядається збудження швидких і повільних вихрових збурень.

В підрозділі 5.1 наведено процедуру виведення аналітичних виразів, що описують збудження солітону нестационарним електричним полем. Описано властивості солітону в сильно нелінійному випадку. Отримано залежність ширини солітону від його амплітуди при великих її значеннях. Показано, що з ростом амплітуди ширина солітону зростає при великих значеннях амплітуди, як в експериментах, так і при чисельному моделюванні.

В підрозділі 5.2 отримано нелінійне векторне рівняння, що описує вихровий рух частинок в схрещених електричному і магнітному полях. Для цього було використано гідродинамічні рівняння для електронів

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} + (\vec{V}\vec{\nabla})\vec{p} = -e\vec{E} + \frac{e}{c}[\vec{H}, \vec{V}] - \left(\frac{\vec{\nabla} p_0}{n_e} \right). \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \vec{\nabla}(n_e \vec{V}) = 0, \quad \vec{p} = m\vec{v}\gamma = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (2)$$

і рівняння Пуассона для електричного поля

$$\vec{\nabla}\vec{E} = 4\pi(q_i n_i - e n_e) \quad (3)$$

Тут $\vec{p}$, $\vec{V}$, n_e , p_0 - імпульс, швидкість, густина і тиск електронів, q_i , n_i - заряд і густина іонів, γ - релятивістський фактор, $\vec{E}$, $\vec{H}$ - електричне та магнітне поля.

$$d_t \left(\frac{\vec{\beta} - \vec{\omega}_{He}}{n_e} \right) = \frac{1}{n_e} ((\vec{\beta} - \vec{\omega}_{He})\vec{\nabla})\vec{V} \quad (4)$$

У виразі (4) введено позначення $\vec{\beta} \equiv [\vec{\nabla} \times \vec{V}_\gamma]$, $d_t \equiv \partial_t + (\vec{V} \vec{\nabla})$, $\vec{\omega}_{He} = e\vec{H}_0/m_e c$ – циклотронна частота електронів; e , m_e – заряд і маса електрона.

У підрозділі 5.3 розглянута дрібномасштабна турбулентність, яка виникає в схрещених радіальному електричному і поздовжньому магнітному полях при існуванні неусувного градієнту зовнішнього магнітного поля. Розглянуті властивості і збудження вихрової турбулентності, яка збуджується в циліндричній радіально неоднорідній плазмі в схрещених радіальному електричному і поздовжньому магнітному полях.

Із загального нелінійного рівняння для завихреності отримано дисперсійне рівняння, що дозволяє визначити діапазон параметрів, для яких вихорова турбулентність пригнічується.

У підрозділі 5.4 теоретично досліджується збудження і пригнічення подібної вихрової турбулентності, яка збуджується в циліндричній плазмі в схрещених радіальному електричному E_{0r} і поздовжньому магнітному H_0 полях. При виведенні дисперсійного співвідношення було враховано, що іони проходять зі швидкістю V_{bi} через сепаратор довжиною L за час, приблизно рівний $\tau_i = \frac{L}{V_{bi}}$. Враховано, що електрони проходять через сепаратор і оновлюються в сепараторі також протягом скінченного часу τ_e .

Аналітично отримано дисперсійне рівняння, що описує можливий розвиток нестійкості збудження вихрової турбулентності в циліндричній плазмі сепаратора в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях з урахуванням скінченної довжини сепаратора, скінченного часу виходу з сепаратора електронів та іонів плазми, скінченного часу перезарядки іонів і скінченного часу поновлення електронів.

$$1 - \frac{\omega_{pi}^2}{(\omega - k_z V_{bi} + i/\tau_i)^2} - \frac{(\ell_\theta/r) \partial_r (\omega_{pe}^2/\omega_{He})}{(\omega - \ell_\theta \omega_{\theta 0} + i/\tau_e) k^2} - \frac{\omega_{pe}^2}{(\omega - \ell_\theta \omega_{\theta 0} + i/\tau_e)^2} \frac{k_z^2}{k^2} = 0 \quad (5)$$

k , k_z , ω – хвильовий вектор, поздовжній хвильовий вектор, частота збурення, V_{bi} – незбурена поздовжня швидкість потоку іонів, ω_{pi} – іонна плазмова частота.

У висновках стисло наведено результати дисертаційного дослідження за темою «Збудження несинусоїдальних хвильових збурень у нерівноважній плазмі».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведене нове вирішення наукової задачі стосовно закономірностей збудження кільватерних полів у плазмі, які забезпечують однорідне фокусування послідовності згустків релятивістських електронів, запропоновані методи підвищення коефіцієнту трансформації. Визначені властивості солітонного збурення великої амплітуди та механізм його збудження поблизу фольги при взаємодії з нею лазерного імпульсу. А також визначені умови пригнічення вихрової турбулентності в сепараторі радіоактивних відходів.

Основні наукові **результати та висновки**, що отримано в дисертаційній роботі, полягають у наступному:

1. Вперше показано, що для однакового та однорідного фокусування електронних згустків – однорідних циліндрів необхідно, щоб довжина кожного згустку була кратна половині довжини кільватерної хвилі $\xi_b = q(\lambda/2)$, $q=1, 2, \dots$, а заряд 1-го згустку був в два рази менше зарядів всіх інших згустків. Проміжок між згустками повинен бути кратним довжині хвилі $\delta\xi = p\lambda$, $p=1, 2, \dots$. Показано, що тільки 1-й згусток обмінюється енергією з кільватерним полем. Радіальна кільватерна сила в областях розташування згустків приблизно постійна уздовж згустків.

Вперше показано, що існує два види лінз з однорідним фокусуванням для послідовності коротких згустків, довжина яких менше половини довжини хвилі. В першому випадку довжина 1-го згустку дорівнює половині довжини хвилі, всі інші згустки короткі, густини заряду всіх згустків в 2 рази більше густини заряду 1-го згустку, проміжки між усіма згустками кратні довжині хвилі λ .

В другому випадку густини заряду всіх згустків в $\sqrt{2}$ рази більше густини заряду 1-го згустку. Проміжок між 1-м і 2-м згустками дорівнює $(n+1/8)\lambda$, $n=1, 2, \dots$. Проміжок між іншими згустками кратний довжині хвилі.

Вперше показано, що для однорідного фокусування суцільного пучка електронів у плазмі передній фронт його повинен бути сходинкою половинної густини заряду довжиною в половину довжини хвилі.

Продемонстровано, що при невеликому перевищенні електронної плазмової частоти над частотою інжекції коротких релятивістських електронних згустків у плазму вони фокусуються, крім тих, які потрапляють на фронти биттів кільватерного поля та не фокусуються.

Продемонстровано, що співвідношення самофокусування за рахунок компенсації об'ємного заряду згустку електронами плазми і фокусування кільватерним полем залежить від форми і довжини згустку.

2. Продемонстровано, що коефіцієнт трансформації, як відношення прискорюючого до гальмуючого кільватерного поля при лінійному профілюванні заряду, як уздовж послідовності, так і вздовж кожного згустку при використанні згустку - передвісника в нелінійному режимі більше максимального відомого зараз $T_E > 2\pi N$, N - число згустків, на 30÷50%. При цьому всі електрони згустків послідовності гальмуються однаковою силою.

Для збільшення числа прискорених електронів і реалізації безперервного режиму роботи прискорювача в профільованому випадку з великим коефіцієнтом трансформації запропоновано нескінченний періодичний ланцюжок прискорених електронних згустків, що перемежуються короткими профільованими ланцюжками згустків електронів, які гальмуються.

Показано, що при відношенні зарядів послідовних згустків, як 1:3:5: ..., і відстані між згустками в півтори довжини хвилі і їх ширині в пів довжини хвилі при збудженні ними кільватерного поля в плазмі останній згусток малого заряду прискорюється.

Показано, що великий коефіцієнт трансформації досягається не тільки при відношенні зарядів згустків 1:3:5: ..., а також при відношенні зарядів 1:5:9: ...

Показано, що при збудженні кільватерного поля послідовністю коротких гаусівських згустків електронів коефіцієнт трансформації зростає з ростом числа згустків не тільки при відстані між згустками, рівній сумі довжини хвилі і половини ширини згустку по підставі, а також при варіації параметрів в деякому інтервалі.

3. При з'ясуванні причини резонансного збудження кільватерного поля нерезонансною послідовністю електронних згустків, яке супроводжується дефокусуванням згустків числовим моделюванням продемонстровано, що до дефокусування згустків призводять такі причини:

- зсув згустків щодо хвилі в нерезонансному випадку за рахунок розбіжності частоти проходження згустків і власної частоти хвилі $\omega_m \neq \omega_0$ деякі згустки потрапляють в області великих радіальних сил;

- через скінченну довжину згустків $\Delta \xi_b$ їх одні фронти фокусуються, а другі дефокусуються;

- через скінченний радіус згустків $r_b \neq 0$ деякі електрони згустків потрапляють в скінченне радіальне поле;

але і такі причини:

- перекид згустків при їх неоднорідному фокусуванні/дефокусуванні веде до перекосу хвилі і, отже, до зміни умов фокусування/дефокусування;

- згустки, які потрапляють в фокусуючі фази поля, розширюються при певних умовах за рахунок розширення бетатронних коливань;

- згустки дефокусуються також внаслідок перекосу хвилі через те, що залишення електронами плазми, що компенсують заряд згустків, осі призводить до того, що плазмова частота на осі $\omega_{pe}(r=0)$ менше плазмової частоти на периферії $\omega_{pe}(r=0) \neq \omega_{pe}(r \neq 0)$.

4. Отриманий інкремент зростання в плазмі амплітуди солітону, який збуджується в експерименті нестационарним електричним полем при взаємодії з металевією фольгою лазерного імпульсу. Показано, що з ростом амплітуди ширина солітону зростає при великих значеннях амплітуди, як і в експериментах.

При дослідженні властивостей і збудження вихрових збурень, збуджуваних в циліндричній радіально неоднорідній плазмі в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях сепаратора матеріалів отримано дисперсійне рівняння, що описує розвиток нестійкості з урахуванням скінченної довжини сепаратора, скінченного часу, за який електрони та іони плазми залишають сепаратор, скінченного часу перезарядки іонів і скінченного часу оновлення електронів. Показано, що урахування цих параметрів призводить до появи порога нестійкості і зменшення інкременту її розвитку.

Результати, здобуті в дисертаційній роботі, дають можливість отримувати більш ефективні кільватерні поля для прискорення та транспортування (фокусування) релятивістських електронних згустків, що можуть бути використані в багатьох науково-дослідницьких центрах. Знайдені умови пригнічення вихрової турбулентності в схрещених радіальному електричному та поздовжньому магнітному полях можуть бути використані при розробці сепаратора матеріалів.

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Lotov K.V., Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Transformation ratio at interaction of long sequence of electron bunches with plasma // Problems of atomic science and technology. Series: nuclear physics investigations (55). 2011. № 3(73). P. 87-91. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, інтерпретації результатів, написання статті).*
2. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.**, Yegorov A.M. Excitation and properties of large amplitude soliton near foil at laser pulse interaction with it // Problems of atomic science and technology. Series: nuclear physics investigations (57). 2012. № 1(77). P. 324-327. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у вивченні властивостей солітонного горба електричного потенціалу, обговоренні результатів).*
3. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Transformation ratio at excitation of nonlinear wakefield in plasma by shaped sequence of electron bunches with linear growth of charge // Problems of atomic science and technology. Series: plasma physics (18). 2012. № 4(80). P. 126-128. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, інтерпретації результатів, написання статті).*
4. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Wakefield excitation in plasma by ramped sequence of ramped electron bunches // Problems of atomic science and technology. Series: nuclear physics investigations (57). 2012. № 6(82). P. 161-163. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, інтерпретації результатів, написання статті).*
5. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Plasma wakefield excitation providing homogeneous focusing of electron bunches // Problems of atomic science and technology. Series: plasma physics (19). 2013. № 1(83). P. 134-136. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, написання статті).*
6. Lotov K.V., Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Mechanisms of synchronization of relativistic electron bunches at wakefield excitation in plasma. Problems of atomic science and technology // Problems of atomic science and technology. Series: plasma electronics and new methods of acceleration (8). 2013. № 4(86) P. 73-76. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, інтерпретації результатів, написання статті).*
7. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Fields excited and providing a uniform focusing of short relativistic electron bunches in plasma // East european journal of physics. 2014. Vol. 1. № 2. P. 92-95. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, написання статті).*
8. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Transformation ratio at plasma wakefield excitation by sequence of electron bunches with ramping of its charge according cosine // East european journal of physics. 2014. Vol. 1. № 4. P. 84-87. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання,*

аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, написання статті).

9. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Wakefield excitation in nonlinear plasma by sequence of relativistic electron bunches // Problems of atomic science and technology. Series: plasma physics (20). 2014. № 6(94). P. 101-103. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, інтерпретації результатів, написання статті).*

10. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.**, Yegorov A.M. Yuferov V.B. Suppression of excited vortical turbulence in inhomogeneous plasma incrossedradial electrical and longitudinal magnetic fields // Problems of atomic science and technology. Series: plasma physics (21). 2015. № 1(95). P. 131-133. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, написання статті).*

11a. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N. Focusing of relativistic electron bunches by nonresonant wakefield excited in plasma // Problems of atomic science and technology. Series: plasma electronics and new methods of acceleration (9). 2015. № 4(98). P. 120-123. (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, інтерпретації результатів, написання статті).*

11б. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N., Yegorov A.M., V.B.Yuferov. Suppression of vortical turbulence in plasma in crossed electrical and magnetic fields due to finite lifetime of electrons and ions and due to finite system length // Problems of atomic science and technology. Series: plasma electronics and new methods of acceleration (9). 2015. № 4 (98). P. 274-276. (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, написання статті).*

12. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N. Transformation ratio at wakefield excitation by linearly shaped sequence of short relativistic electron bunches in plasma // Problems of atomic science and technolog. Series: nuclear physics investigation (65). 2015. № 6(100). P. 37-41. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, написання статті).*

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях)за темою дисертації:

13а. Лотов К.В., Маслов В.И., Онищенко И.Н., **Яровая И.П.** Коэффициент трансформации при взаимодействии длинной последовательности электронных сгустков с плазмой // IX конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Тезисы докладов Харьков. 21-25 февраля 2011. С. 87. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів).*

13б. Азаренков И.Н., Егоров А.М., Маслов В.И., Свистун Е.Н., **Яровая И.П.** Численное моделирование регулярности кильватерного поля при конечном радиусе плазмы // IX конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям:Тезисы докладов Харьков, 21-25 февраля 2011. С. 87-88. *(Особистий*

внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів).

14. Егоров А.М., Маслов В.И., Онищенко И.Н., **Яровая И.П.** Возбуждение и свойства солитона, двигающегося с тепловой скоростью электронов плазмы, в окрестности фольги при взаимодействии с ней лазерного импульса // XII Международный семинар по ускорителям заряженных частиц: Тезисы докладов. Алушта, Крым. 22-28 сентября 2011. С. 37. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів).*

15. Лотов К.В., Маслов В.И., Онищенко И.Н., **Яровая И.П.** Коэффициент трансформации при возбуждении нелинейной кильватерной волны в плазме, профилированной последовательностью электронных сгустков с линейно нарастающей интенсивностью // X конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Тезисы докладов. Харьков. 27 февраля -2 марта 2012. С. 87. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

16a. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Plasma wakefield excitation, possessing of homogeneous focusing of electron bunches // International conference-school on plasma physics and controlled fusion and the adjoint workshop «Nano-and micro-sized structures in plasmas»: Book of abstracts. Alushta (Crimea). Ukraine. 17-22 September 2012. P. 128. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

16б. Kiselev V.A., Linnik A.F., Maslov V.I., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., **I.P.Yarovaya** . Acceleration and focusing of electron bunches by wakefields in plasma produced in neutral gas by a nonresonant sequence of bunches // International conference-school on plasma physics and controlled fusion and the adjoint workshop «Nano-and micro-sized structures in plasmas»: Book of abstracts Alushta (Crimea). Ukraine. September 17-22, 2012. P. 140. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів).*

16в. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Wakefield excitation in plasma by sequence of shaped electron bunches // International conference-school on plasma physics and controlled fusion and the adjoint workshop «Nano-and micro-sized structures in plasmas»: Book of abstracts Alushta (Crimea). Ukraine. September 17-22, 2012. P. 142. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

17. Маслов В.И., Онищенко И.Н., **Яровая И.П.** Коэффициент трансформации при возбуждении кильватерного поля в плазме последовательностью электронных сгустков с профилированием его заряда по косинусу // XIII Международный семинар по ускорителям заряженных частиц: Тезисы докладов. Алушта, Крым. 08-14 сентября, 2013. С. 45-46. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів).*

18a. **Ярова І.П.**, Азаренков М.О., Маслов В.І. Вихрова струмова петля у джерелах вакуумного ультрафіолету для нанолітографії // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу—2013: Тези доповіді в

збірнику анотацій. Київ, Україна. 24-25 вересня, 2013. С. 77. *(Особистий внесок здобувача: участь у аналітичному дослідженні, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

18б. Маслов В.І., Онищенко І.М., **Ярова І.П.**, Залежність радіальної динаміки довгого релятивістського згустку частинок, що рухається в плазмі, від позовжнього розподілу його заряду // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу—2013: Тези доповіді в збірнику анотацій Київ, Україна. 24-25 вересня 2013. С. 61. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

19. Маслов В.И., Онищенко И.Н., Яровая И.П. Кильватерная плазменная линза, обеспечивающая однородную фокусировку последовательности коротких релятивистских электронных сгустков // 11-я Курчатовская молодежная научная школа: Сборник аннотаций. Москва, Российская Федерация. 12-15 ноября 2013. С. 197. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

20. Маслов В.И., Онищенко И.Н., **Яровая И.П.** Поля в плазме, возбуждаемые короткими релятивистскими электронными сгустками и обеспечивающие однородную их фокусировку // XII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Тезисы докладов Харьков, Украина. 17-21 марта 2014. С. 89. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, інтерпретації результатів, доповідач).*

21а. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.** Wakefield excitation in nonlinear plasma by sequence of relativistic electron bunches // International conference-school on plasma physics and controlled fusion and the adjoint workshop "Nano- and micro-sized structures in plasmas": Book of abstracts. Kharkiv, Ukraine. 15-18 September 2014. P. 98. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні числового моделювання, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

21б. Maslov V.I., Onishchenko I.N., **Yarovaya I.P.**, Yegorov A.M. Yuferov V.B. Suppression of excited vortical turbulence in inhomogeneous plasma in crossed radial electrical and longitudinal magnetic fields // International conference-school on plasma physics and controlled fusion and the adjoint workshop "Nano- and micro-sized structures in plasmas": Book of abstracts. Kharkiv, Ukraine. 15-18 September 2014. P. 107. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

22а. **Левчук И.П.**, Маслов В.И., Онищенко И.Н. Коэффициент трансформации при возбуждении кильватерного поля линейно профилированной последовательностью коротких релятивистских электронных сгустков // XXIV Международный семинар по ускорителям заряженных частиц: Тезисы докладов Харьков, Украина. 21-25 сентября 2015. С. 17-18. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

22б. **Левчук И.П.**, Маслов В.И., Онищенко И.Н. Кильватерная и плазменная фокусировки в зависимости от формы сгустка релятивистских электронов // XXIV Международный семинар по ускорителям заряженных частиц: Тезисы докладов.

Харьков, Україна. 21-25 сентября 2015. С. 50-51. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

23а. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N., Yegorov A.M. Yuferov V.B. Plasma vortical turbulence suppression in crossed electrical and magnetic fields due to finite lifetime of electrons and ions and due to finite system length // Nineteenth international summer school on vacuum, electron and ion technologies: Book of abstracts. Sozopol, Bulgaria. 21-25 September 2015. P. 76. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

23б. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N. Providing homogeneous and identical focusing of train of short relativistic electron bunches by wakefield plasma lens // Nineteenth international summer school on vacuum, electron and ion technologies: Book of abstracts. Sozopol, Bulgaria. 21-25 September 2015. P. 77. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

24. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N. Homogeneous Focusing of Train of Short Relativistic Electron Bunches by Plasma Wakefield // The 7th International particle accelerator conference (IPAC'16): Abstract brochure, Student poster session. Busan, Korea. 8-13 May, 2016. P.8-9. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

25а. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N. Homogeneous focusing of train of short relativistic electron bunches by plasma wakefield // Proc. of IPAC2016. Busan, Korea. 8-13 May 2016. P. 2599-2601. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

25б. **Levchuk I.P.**, Maslov V.I., Onishchenko I.N. Self-focusing and wakefield-focusing of relativistic electron bunches in plasma // Proc. of IPAC2016. Busan, Korea. 8-13 May 2016. P. 2602-2604. *(Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні задачі дослідження, аналітичного дослідження, обговоренні та інтерпретації результатів, доповідач).*

АНОТАЦІЯ

Левчук І.П. Збудження несинусоїдальних хвильових збурень у нерівноважній плазмі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України, Харків, 2019 р.

Дисертаційну роботу присвячено теоретичному дослідженню збудження несинусоїдальних хвильових збурень у нерівноважній плазмі, механізмам збудження кільватерних полів у плазмі резонансною та нерезонансною послідовностями

релятивістських електронних згустків, а також суцільним пучком релятивістських електронів.

Методом числового моделювання визначено умови збудження кильватерних полів у плазмі, що забезпечують однорідне фокусування послідовності згустків релятивістських електронів. Знайдено способи підвищення коефіцієнта трансформації з метою збільшення темпу прискорення. Визначено умови реалізації однорідного фокусування для послідовності релятивістських електронних згустків і для випадку суцільного пучка.

Визначено властивості солітонного збурення великої амплітуди і механізм його збудження поблизу фольги при взаємодії з нею лазерного імпульсу. Виконано аналітичний опис збудження солітону нестационарним електричним полем.

Теоретично досліджено властивості і збудження вихрових збурень, які збуджуються в циліндричній радіально неоднорідній плазмі в схрещених радіальному електричному і поздовжньому магнітному полях. Визначено умови пригнічення вихрової турбулентності в такій системі. Отримано дисперсійне рівняння, що дозволяє визначити діапазон параметрів експериментальної установки, для яких вихорова турбулентність пригнічується.

Ключові слова: кильватерна хвиля, згусток релятивістських електронів, числове моделювання, однорідне фокусування, вихрова турбулентність, солітон.

АННОТАЦИЯ

Левчук И.П. Возбуждение несинусоидальных волновых возмущений в неравновесной плазме. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Министерство образования и науки Украины. – Харьков, 2019 г.

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию возбуждения несинусоидальных волновых возмущений в неравновесной плазме, механизмов возбуждения кильватерных полей в плазме резонансной и нерезонансной последовательностями релятивистских электронных сгустков, а также в случае сплошного пучка релятивистских электронов.

Методом численного моделирования определены условия возбуждения кильватерных полей в плазме, обеспечивающих однородную фокусировку последовательности сгустков релятивистских электронов. Найдены способы повышения коэффициента трансформации с целью увеличения темпа ускорения. Определены условия реализации однородной фокусировки для последовательности релятивистских электронных сгустков и для случая сплошного пучка.

Определены свойства солитонного возмущения большой амплитуды и механизм его возбуждения вблизи фольги при взаимодействии с ней лазерного импульса. Выполнено аналитическое описание возбуждения солитона нестационарным электрическим полем.

Теоретически исследованы свойства и возбуждение вихревых возмущений, возбуждаемых в цилиндрической радиально неоднородной плазме в скрещенных

радиальном электрическом и продольном магнитном полях. Определены условия подавления вихревой турбулентности в такой системе. Получено дисперсионное уравнение, позволяющее определить диапазон параметров экспериментальной установки, для которых вихревая турбулентность подавляется.

Ключевые слова: кильватерная волна, сгусток релятивистских электронов, численное моделирование, однородная фокусировка, вихревая турбулентность, солитон.

ABSTRACT

Levchuk I.P. Excitation of nonsinusoidal perturbations in nonequilibrium plasmas. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of science in physics and mathematics by speciality 01.04.08 – plasma physics. – V.N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis deals with the theoretical investigation of the excitation of non-sinusoidal wave perturbations in a nonequilibrium plasmas, the mechanisms of excitation of wakefield in a plasma by the resonant and nonresonant sequences of relativistic electron bunches, and in the case of a continuous beam of relativistic electrons.

It is shown that the focusing of electron bunches under certain conditions may be homogeneous, which can be used for electron beam focusing in colliders, due to excited transverse wakefield. Therefore, the thesis deals with a wakefield plasma lens, which provides identical and uniform focusing relativistic electron bunches of the sequence in plasma. Conditions of excitation of such non-sinusoidal fields in plasma have been determined by numerical simulation. Also, it has been described analytically the mechanism of focusing relativistic electron bunches by the plasma wakerfield. A wakefield plasma lens was investigated for the case of short relativistic electron bunches $\Delta\xi_b < \lambda/2$ and it was shown that there are two types of lenses for a sequence of short bunches.

Focusing of the sequence of relativistic electrons bunches by wakefield is studied for both resonant (repetition frequency of bunches is equal to electron plasma frequency) and nonresonant cases. It is shown that focusing in the resonance case is highly nonhomogeneous. And in the case of nonresonant wakefield the plasma lens for a short sequence of identical bunches of relativistic electrons, whose length is less than half of the wavelength, there is a set of optimal parameters in which they are all in the focusing wakefields.

Theoretical studies conducted in the dissertation are necessary in the practical application for the significant increase of accelerating gradient and for focusing of electron bunches in the accelerators, which allow to reduce not only the size of the accelerators, but their cost, as well as availability, it will be possible to perform researches not only in large research centers. One section of the dissertation is devoted to the study of increase of the transformer ratio in linear and nonlinear cases at the wakefield excitation by a long sequence of electron bunches, when their charges are profiled according to the linear dependence along the sequence and along the bunches. It is shown that the transformer

ratio T_E can reach a large value as for different lengths of bunches $\Delta\xi_b = \lambda, 2\lambda, \dots$, so for different distances between bunches. For increase it is important to derive homogeneous decelerating field along the driver bunches, so that all electrons of the bunches are completely decelerated. For this purpose it has been used before the sequence of bunches a precursor of a small charge, and the transformer ratio was higher on 30÷50% than the current maximum of $2\pi N$, where N is the number of bunches. It's almost perfect wakefield accelerator since it is possible provide full driver decelerating in almost identical fields in the case of maximum T_E . So it is possible to get a large value T_E , but the radial wake force F_r increases along the sequence, which can leads to instability. It was found that stationary operating regime of the accelerator can be achieved by selection of certain witness-bunches (bunches that are accelerated in plasma) and agreeing them with certain driver-bunches (bunches that excite wakefield) that will alternate each others. A scheme in which accelerated bunches are alternated by bunches – driver- trapezium, which restore the amplitude of the wakefield after each accelerated dense bunch. The advantages of this scheme are not only a uniform decelerating, a large transformer ratio $T_E \approx 2\pi N_{fr}$, a large current of accelerated bunches, but also the identical focusing force for all bunches-drivers in the nonlinear case.

The problem of resonant excitation of the wakefield by a long sequence of relativistic electron bunches has been considered and investigated.

One section of the dissertation is devoted to the study of the excitation and properties of a soliton moving with the thermal velocity of plasma electrons in the vicinity of the foil at the interaction of the laser pulse with it. The procedure of derivation of analytical expressions, describing excitation of a soliton by a non-stationary electric field, is presented. The properties of a soliton in a strongly nonlinear case have been described. The dependence of the width of a soliton on its amplitude for its large values has been obtained.

The instabilities can significantly affect to the efficiency and quality of the particle separator on the masses. These instabilities are excited in other devices under similar conditions in crossed radial electric and longitudinal magnetic fields. Therefore the dispersion relation, describing the possible development of the instability of excitation of vortical turbulence in a cylindrical plasma of separator in crossed radial electric and longitudinal magnetic fields, has been derived. This dispersion relation has been derived taking into account the finite length of the separator, the finite time of the exit of plasma electrons and ions from the separator, finite time of charge exchange of ions, and finite time of electron renewal. The instability development of excitation of vortical turbulence in a cylindrical plasma with crossed electric and magnetic fields has been investigated analytically. Excitation of fast and slow vortical perturbations has been considered.

Key words: wakefield excitation, bunch of relativistic electrons, numerical simulation, uniform focusing, vortical tubulance, soliton.