

ГАЛУЗЬ ТЕХНІКИ, ДО ЯКОЇ НАЛЕЖИТЬ ВІНАХІД

Варіанти здійснення, описані тут, стосуються загалом систем магнітного утримання плазми, а конкретніше - систем і способів, які полегшують формування і збереження високоенергетичної і високотемпературної плазми в оберненій магнітній конфігурації (плазми FRC) з чудовою стійкістю, а також з утриманням частинок, енергії і потоку.

РІВЕНЬ ТЕХНІКИ

Обернена магнітна конфігурація (FRC, Field Reversed Configuration) належить до класу топологій магнітного утримання плазми, відомих як компактні тороїди (CT, compact toroid). Вона демонструє переважно полоїдальні магнітні поля і має нульові або малі самогенеровані тороїдальні поля (див. М. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)). Перевагами такої конфігурації є її проста геометрія для зручності побудови і збереження, природний необмежений дивертор для полегшення виведення енергії і золовидалення і дуже високе β (β - це відношення середнього тиску плазми до середнього тиску магнітного поля всередині FRC), тобто, висока густина потужності. Природа високого β є переважною для економічної роботи і для використання провідних, анейтронних видів палива, таких як D-He3 і p-B11.

Традиційний спосіб формування FRC передбачає застосування технології Θ -пінча із оберненим полем, що дає гарячі високі плазми (див. А. L. Hoffman і J. T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993)). Різновидом цього є спосіб перенесення і захоплення, при здійсненні якого плазму, створену в "джерелі" тета-пінча, в більшій або меншій мірі негайно ежектують з одного торця в камеру утримання. Потім здійснюють захоплення переносимого плазмоїда між двома міцними дзеркалами на торцях камери (див., наприклад, Н. Himura, S. Okada, S. Sugimoto і S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995)). Як тільки цей плазмоїд виявляється в камері утримання, можна застосовувати різні способи нагрівання і збудження струму, такі, як інжекція пучка частинок (нейтральних або нейтралізованих), обертові магнітні поля, нагрівання струмами високої частоти або омичне нагрівання, і т. д. Це розділення функцій джерела і утримання дає ключові інженерні переваги для потенційних майбутніх реакторів термоядерного синтезу. FRC довели свою виняткову стійкість до зовнішніх впливів, пристосовуваність до динамічного формування, перенесення й інтенсивних подій захоплення. Більше того: вони демонструють тенденцію допускати переважний стан плазми (див., наприклад, Н. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller, і L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). За останнє десятиріччя досягнутий значний прогрес у розвитку інших способів формування FRC: за допомогою об'єднання сфермаків із протилежно спрямованими спіральностями (див., наприклад, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama і T. Okazaki, Nucl. Fusion 39, 2001 (1999)) і за допомогою збудження струму обертовими магнітними полями (RMF, rotating magnetic field) (див., наприклад, I. R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)), яке також забезпечує додаткову стійкість.

Був істотно дорозрацьований метод зіткнення і об'єднання, запропонований вже давно (див., наприклад, D. R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966)): два окремі тета-пінчі на протилежних торцях камери утримання одночасно генерують і прискорюють два плазмоїди у напрямку один до одного на високій швидкості, які потім зіштовхуються у центрі камери утримання і об'єднуються, формуючи складову FRC. При розробці й успішному проведенні одного з найбільш крупномасштабних до теперішнього часу експериментів з FRC, звичайний спосіб зіткнення і об'єднання показав, що дає стійкі високотемпературні FRC з великим часом життя і великою густиною потоку частинок (див., наприклад, M. Binderbauer, et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)). Зовсім недавно досягнутий значний прогрес при використанні методу зіткнення і об'єднання в експериментах зі збуджуваною пучками FRC, які дають відносно високотемпературні плазми FRC протягом тривалого часу (типові параметри плазми: $T_e \sim 250$ eV, $T_i \sim 1$ keV, $n_e \sim 2-3 \times 10^{13}$ cm⁻³, $B_e \sim 1$ kG, час життя плазми (30 мс) при використанні інжекції (NBI, neutral-beam injection) високоенергетичних пучків нейтральних частинок (NB, neutral-beam) і ефективного граничного зміщення (див., наприклад, Gota, H. et al., Nucl. Fusion 57, 116021 (2017); Gota, H. et al., Nucl. Fusion 59, 112009 (2019); і Gota, H. et al., Bull. Am. Phys. Soc. 64, UP10.00123 (2019)). У таких експериментах плазму-ціль для NBI отримують за допомогою зіткнення і об'єднання двох плазм FRC з використанням методу динамічного формування тета-пінча із оберненим полем (F RTP, field-reversed theta-pinch) (Binderbauer, Phys. Rev. Lett. 105), в якому уловлюваний магнітний потік об'єднаної FRC спочатку становить ~ 5 мВб, що базується на моделі жорсткого ротора із зовнішнім магнітним полем ~ 1 кГс в утримувальній секції. Шляхом інжекції високоенергетичних NB потужністю > 13 МВт (що збільшується до ~ 21 МВт шляхом налаштування енергії пучка під час імпульсу) в плазму-ціль, відбувається захоплення швидких частинок зсередини і ззовні від сепаратиси і переміщення їх зсередини і ззовні від сепаратиси з великою орбітою для нагрівання насамперед електронів, а також для збудження струму, в якому відбувається майже класичне утримання швидких іонів. Ця інжекція високоенергетичних NBI не досягалася в жодному іншому експерименті з компактними тороїдами (CT) і виявилася дуже важливою демонстрацією життєздатності концепції збуджуваних пучками FRC і її технічної готовності (Gota, Nucl. Fusion 59; Gota, Bull. Am. Phys. Soc. 64).

Бажані вдосконалені системи, пристрої і способи генерування цільової плазми FRC з високим потоком і можливістю осьового поповнення.

СУТЬ ВИНАХОДУ

Можливі варіанти здійснення систем, пристроїв і способів, запропоновані тут, призначені для генерування цільової плазми FRC, яка має високий потік, з можливістю осьового поповнення плазми FRC. Щоб генерувати оптимальну вихідну цільову плазму FRC з високим потоком, інжектори сферомаків середнього масштабу (що також називаються інжекторами компактних тороїдів (СТ)) зв'язують один навпроти одного з торцями центрально розташованої камери утримання плазми. Інжектори сферомаків інjektують сферомак у напрямку до середньої площини камери утримання, де сферомак об'єднуються і утворюють плазму FRC в камерах утримання. Об'єднання протилежно спрямованих спіральностей двох сферомаків має тенденцію породжувати плазми FRC з підвищеним захоплюваним магнітним потоком. З камерою утримання також пов'язана множина інжекторів пучків нейтральних частинок для збудження і збереження плазми FRC.

У можливих варіантах здійснення інжектори пучків нейтральних частинок виконані з можливістю регулювання від деякого вихідного рівня потужності до деякого підвищеного рівня потужності.

У додаткових можливих варіантах здійснення інжектори сферомаків виконані з можливістю багатоімпульсної інжекції сферомаків у плазму FRC вздовж геометричної осі камери утримання з метою ефективного поповнення і стікання.

Інші системи, пристрої, способи, ознаки і переваги згідно з об'єктом винаходу, що описується тут, будуть або стануть очевидними фахівцям в цій галузі техніки після перегляду нижченаведених креслень і детального опису. Передбачається, що всі такі додаткові системи, способи, ознаки і переваги повинні бути вміщені в межах цього опису, знаходитися в межах обсягу охорони згідно з об'єктом винаходу, що описується тут, і захищені прикладеною формулою винаходу. Ознаки можливих варіантів здійснення в жодному разі не треба інтерпретувати як такі, що обмежують прикладену формулу винаходи, якщо немає конкретного розкриття тих ознак у формулі винаходу.

КОРОТКИЙ ОПИС КРЕСЛЕНЬ

Супровідні креслення, які включені в цей опис як його частина, ілюструють переважні в цей час можливі варіанти здійснення і разом із загальним описом, наведеним вище, і детальним описом можливих варіантів здійснення, що наводиться нижче, служать для пояснення принципів цього винаходу і навчання їм.

Фіг. 1 ілюструє утримання частинок у пропонованій системі FRC у високоефективному режимі FRC (режим HPF, high performance FRC regime) порівняно зі звичайним режимом FRC (режим CR, conventional FRC regime) і порівняно з традиційними експериментами з іншими FRC.

Фіг. 2 ілюструє компоненти пропонованої системи FRC і магнітної топології FRC, що отримується в пропонованій системі FRC.

Фіг. 3A ілюструє базове компонування пропонованої системи FRC на вигляді зверху, включаючи переважне розташування центральної ємності для утримання, формувальної секції, диверторів, пучків нейтральних частинок, електродів, плазмових гармат, дзеркальних пробок і інжектора таблеток.

Фіг. 3B ілюструє центральну ємність для утримання на вигляді зверху і показує пучки нейтральних частинок, розташовані під прямим кутом до головної осі симетрії центральної ємності для утримання.

Фіг. 3C ілюструє центральну ємність для утримання на вигляді зверху і показує пучки нейтральних частинок, розташовані під меншим кутом, ніж прямий, до головної осі симетрії центральної ємності для утримання, і спрямовані на інжекцію частинок у напрямку до середньої площини центральної ємності для утримання.

Фіг. 3D і 3E ілюструють вигляд зверху і перспективне зображення, відповідно, базового компонування згідно з альтернативним варіантом здійснення пропонованої системи FRC, включаючи переважне розташування центральної ємності для утримання, формувальної секції, внутрішніх і зовнішніх диверторів, пучків нейтральних частинок, розташованих під меншим кутом, ніж прямий, до головної осі симетрії центральної ємності для утримання, електродів, плазмових гармат і дзеркальних пробок.

Фіг. 4 ілюструє схему компонентів системи імпульсного живлення для формувальних секцій.

Фіг. 5 ілюструє ізометричне зображення окремого формувального модуля імпульсного живлення.

Фіг. 6 ілюструє ізометричне зображення вузла формувальних труб.

Фіг. 7 ілюструє ізометричне зображення в частковому перерізі системи пучків нейтральних частинок і ключових компонентів.

Фіг. 8 ілюструє ізометричне зображення засобів генерування пучків нейтральних частинок на камері утримання.

Фіг. 9 ілюструє ізометричне зображення в частковому перерізі переважного розташування систем Ti- і Li-гетерування.

Фіг. 10 ілюструє ізометричне зображення в частковому перерізі плазмової гармати, встановленої в камері диверторів. Також показані відповідна магнітна дзеркальна пробка і електродний вузол диверторів.

Фіг. 11 ілюструє переважну схему розташування кільцевого електрода зміщення на осьовому торці камери утримання.

Фіг. 12 ілюструє еволюцію радіуса потоку, що виключається, в системі FRC, отриманого, виходячи з ряду зовнішніх діаманітних контурів у двох формувальних секціях тета-пінчів із оберненим полем і магнітних зондів, закладених всередині центральної металевої камери утримання. Час вимірюється з моменту обертання синхронізованого поля в джерелах для формування, а відстань z задається відносно осової середньої площини машини.

Фіг. 13A, 13B, 13C і 13D ілюструють дані від типового непідтримуваного розряду в режимі не-HPF в пропонованій системі FRC. Показані як функції часу: (фіг. 13A) радіус потоку, що виключається, на середній площині, (фіг. 13B) 6 хорд лінійно-інтегрованої густини з інтерферометра, який знаходиться в середній площині, для визначення вмісту CO_2 , (фіг. 13C) радіальні профілі густини, інвертовані за Абелем, за даними інтерферометра для визначення вмісту CO_2 і (фіг. 13D) загальна температура плазми, виходячи з балансу тиску.

Фіг. 14 ілюструє осьові профілі потоку, що виключається, у вибрані моменти часу для одного і того ж розряду з пропонованої системи FRC, показаної на фіг. 13A, 13B, 13C і 13D.

Фіг. 15 ілюструє ізометричне зображення відхильних котушок, встановлених ззовні камери утримання.

Фіг. 16A, 16B, 16C і 16D ілюструють кореляції часу життя FRC і тривалості імпульсів інжектіваних пучків нейтральних частинок. Як показано, більш тривалі імпульси пучка дають більший час життя FRC.

Фіг. 17A, 17B, 17C і 17D ілюструють окремі і сукупні ефекти різних компонентів системи FRC на робочі характеристики FRC і досягнення режиму HPF.

Фіг. 18A, 18B, 18C і 18D ілюструють дані з типового режиму HPF непідтримуваного розряду в пропонованій системі FRC. Показані як функції часу: (фіг. 18A) радіус потоку, що виключається, на середній площині, (фіг. 18B) 6 хорд лінійно-інтегрованої густини з інтерферометра, який знаходиться в середній площині, для визначення вмісту CO_2 , (фіг. 18C) радіальні профілі густини, інвертовані за Абелем, за даними інтерферометра для визначення вмісту CO_2 і (фіг. 18D) загальна температура плазми з балансу тиску.

Фіг. 19 ілюструє утримання потоку як функцію температури (T_e) електронів. Це дає графічне уявлення про знову встановлюваний режим масштабування, який перевершує відомі, для розрядів у HPF.

Фіг. 20 ілюструє час життя FRC, що відповідає тривалості імпульсу не похилих і похилих інжектіваних пучків нейтральних частинок.

Фіг. 21A, 21B, 21C, 21D і 21E ілюструють вплив тривалості імпульсу похилого пучка нейтральних частинок і часу життя плазми FRC на такі параметри, як радіус плазми, густина плазми, температура плазми і магнітний потік, що відповідають тривалості імпульсу похилих інжектіваних пучків нейтральних частинок.

Фіг. 22A і 22B ілюструють базове компонування інжектора компактних тороїдів (CT).

Фіг. 23A і 23B ілюструють центральну ємність для утримання, демонструючи встановлений на неї інжектор CT.

Фіг. 24A і 24B ілюструють базове компонування згідно з альтернативним варіантом здійснення інжектора CT, що має пов'язану з ним дрейфову трубку.

Фіг. 25 ілюструє ізометричне зображення в перерізі системи пучків нейтральних частинок і ключові компоненти налаштовуваної віддаваної потужності пучків нейтральних частинок.

Фіг. 26 схематично ілюструє систему пучків нейтральних частинок з налаштовуваною віддаваною потужністю пучків нейтральних частинок.

На фіг. 27 представлено схематичне зображення, яке ілюструє механізм керування осьовим положенням плазми FRC в межах ємності для утримання (CV, confining vessel).

На фіг. 28 представлена блок-схема послідовності операцій алгоритму керування основоположним режимом ковзання.

На фіг. 29 представлений складовий графік прикладів моделювання керування осьовим положенням у режимі ковзання.

На фіг. 30 представлений складовий графік прикладів моделювання керування осьовим положенням в режимі ковзання.

На фіг. 31A і 31B представлені схематичні зображення, де показаний можливий варіант здійснення системи утримання FRC з протилежними інжекторами сферомаків.

Фіг. 32A, 32B, 32C і 32D ілюструють етапи в процесі формування FRC за допомогою об'єднання сферомаків із протилежно спрямованими спіральностями.

На фіг. 33 представлено схематичне зображення, де показаний можливий варіант здійснення інжектора сферомаків.

Потрібно зазначити, що креслення не обов'язково виконані в масштабі і що елементи аналогічних конструкцій або функцій в загальному випадку позначені однаковими позиціями на всіх кресленнях з

метою ілюстрації. Потрібно також зазначити, що креслення призначені тільки для полегшення опису різних варіантів здійснення, про які тут йдеться. На кресленнях не обов'язково описується кожний аспект ідей, що пропонуються тут, і креслення не обмежують обсяг охорони згідно з формулою винаходу

ДЕТАЛЬНИЙ ОПИС

Раніше, ніж перейти до детального опису об'єкта цього винаходу, потрібно зрозуміти, що цей винахід не обмежується описуваними конкретними варіантами здійснення, а - як такий - звичайно ж, може бути змінений. Потрібно також зрозуміти, що термінологія, яка вживається тут, має на меті лише опис конкретних варіантів здійснення, а не призначена для обмеження, оскільки обсяг охорони цього винаходу буде обмежуватися тільки прикладеною формулою винаходу.

Крім цього, типові приклади варіантів здійснення, що описуються тут, які передбачають використання багатьох із додаткових ознак, які указуються, як разом, так і окремо, тепер будуть описані з додатковою детальністю з посиланнями на прикладені креслення. Цей детальний опис призначений просто для навчання фахівця в цій галузі техніки практичного втілення переважних додаткових принципів аспектів винаходу і не призначений для обмеження обсягу охорони винаходу. Тому комбінації ознак і етапів, що розкриваються в нижченаведеному детальному описі, можуть і не виявитися необхідними для практичного здійснення винаходу в найширшому значенні, а замість цього вказані лише для того, щоб конкретно описати типові приклади принципів цього винаходу.

Крім цього, різні ознаки типових прикладів і залежних пунктів формули винаходу можуть бути об'єднані способами, що не перераховуються конкретно і в явному вигляді, з метою забезпечення додаткових корисних варіантів здійснення принципів цього винаходу. Також очевидно, що всі ознаки, розкриті в описі і/або формулі винаходу, призначені для розкриття окремо і незалежно один від одного з метою первинного розкриття, а також з метою обмеження об'єкта винаходу, що заявляється, незалежно від складів ознак у варіантах здійснення і/або формулі винаходу. Також очевидно, що всі діапазони значень або вказівки груп об'єктів розкривають кожне можливе проміжне значення або кожний проміжний об'єкт з метою первинного розкриття, а також з метою обмеження об'єкта винаходу, що заявляється.

Варіанти здійснення цього винаходу, запропоновані тут, спрямовані на розробку систем і способів, які полегшують формування і збереження FRC з чудовою стійкістю, а також утриманням частинок, енергії і потоку. Деякі з варіантів здійснення цього винаходу, запропонованих тут, спрямовані на розробку систем і способів, які полегшують формування і збереження FRC з підвищеними енергіями системи і поліпшеною підтримкою інжекторів пучків нейтральних частинок з можливостями налаштовуваних енергій пучків вздовж осі симетрії камери утримання плазми FRC незалежно від властивостей осьової стійкості рівноваги плазми FRC.

Раніше, ніж звернутися до систем і способів, які полегшують генерування і збереження цільової плазми FRC з високим потоком і осьове поповнення плазми FRC з використанням пари інжекторів сфермаків середнього масштабу (або пари намагнічених коаксіальних плазмових гармат (MCPG, magnetized coaxial plasma gun)), обговоримо системи і способи формування та збереження високоефективних FRC, надаючи їм чудову стійкість, а також чудове утримання частинок, енергії і потоку порівняно зі звичайними FRC. Такі високоефективні FRC забезпечують шлях до цілої множини застосувань, включаючи компактні джерела нейтронів (для виробництва ізотопів медичного призначення, відновлення відпрацьованого ядерного палива, досліджень матеріалів, нейтронної радіографії і томографії), компактні джерела фотонів (для хімічного виробництва і хімічної обробки), системи для розділення ізотопів і збагачення, а також активні зони реакторів для синтезу легких ядер з метою вироблення енергії в майбутньому.

Щоб оцінити, чи існує режим утримання в FRC, що перевершує відомі, досліджені різні допоміжні системи і робочі режими. Ці зусилля привели до важливих наукових відкриттів і розробки парадигми високоефективної FRC, що описується тут. Відповідно до цієї нової парадигми, ці системи і способи поєднують множину нових ідей і засобів для різкого поліпшення утримання за допомогою FRC, як ілюструється на фіг. 1, а також забезпечують контроль стійкості без негативних побічних ефектів. Як детальніше розглядається нижче, фіг. 1 ілюструє утримання частинок в системі 10 FRC, що описується нижче (див. фіг. 2 і 3), під час роботи відповідно до високоефективного режиму FRC (режиму HPF) при формуванні і збереженні FRC порівняно з роботою відповідно до звичайного режиму FRC (режиму CR) при формуванні і збереженні FRC і порівняно з утриманням частинок відповідно до звичайних режимів формування і підтримки FRC, що використовуються в інших експериментах. У цій публікації будуть наведені загальний і детальний опис нових окремих компонентів системи 10 FRC і способів, а також їхні сукупні ефекти.

Система FRC

Вакуумна система

На фіг. 2 і 3 ілюструється схематичне зображення пропонованої системи 10 FRC. Система 10 FRC включає в себе центральну ємність 100 для утримання, оточену двома діаметрально протилежними формувальними секціями 200 тета-пінчів із оберненим полем, і дві камери 300 диверторів, що

знаходяться поза формувальними секціями 200 і призначені для контролю густини нейтральних частинок і забруднення домішками. Пропонована система 10 FRC була побудована так, що вона пристосована до надвисокого вакууму і працює при типових початкових тисках $1,333 \times 10^{-6}$ Па (10^{-8} тор). Такі вакуум-метричні тиски вимагають використовувати стикувальні фланці спареної відкачки між стикованими компонентами, металеві кільцеві ущільнення круглого поперечного перерізу, високочисті внутрішні стінки, а також ретельне початкове кондиціонування поверхонь усіх деталей перед збиранням, таке, як фізичне і хімічне очищення з подальшими вакуумним сушінням протягом 24-х годин при 250 °C і очищенням тліючим розрядом у водні.

Формувальні секції 200 тета-пінчів із оберненим полем являють собою стандартні тета-пінчі із оберненим полем (F RTP), хоча і з вдосконаленою формувальною системою імпульсного живлення, що детально обговорюється нижче (див. фіг. 4-6). Кожна формувальна секція 200 виконана зі стандартних непрозорих кварцових труб промислового класу, які відрізняються двомилиметровою внутрішньою футерівкою з надчистого кварцу. Камера 100 утримання виконана з нержавіючої сталі для забезпечення множини радіальних і тангенціальних отворів; вона також служить як консерватор потоку у часовому масштабі експериментів, що описуються нижче, і обмежує швидкі магнітні перехідні процеси. Вакуум створюється і зберігається в межах системи 10 FRC за допомогою набору безмасляних спіральних форвакуумних насосів, турбомолекулярних насосів і кріонасосів.

Магнітна система

На фіг. 2 і 3 ілюструється магнітна система 400. На фіг. 2 - серед інших конструктивних особливостей - ілюструються профілі магнітного потоку і густини FRC (як функції радіальних і осевих координат), властиві FRC 450, що створюється за допомогою системи 10 FRC. Ці профілі виходять методом двовимірного чисельного моделювання за допомогою резистивного магнітогідродинамічного (MHD) генератора Хола з використанням коду, розробленого для моделювання систем і способів, що відповідають системі 10 FRC, і добре узгоджуються з експериментальними даними вимірювань. Як видно на фіг. 2, FRC 450 складається з тора силових ліній замкнутого поля у внутрішньому просторі 453 FRC 450 зсередини від сепаратиси 451 і кільцевого граничного шару 456 на незамкнутих силових лініях 452 поля тільки ззовні від сепаратиси 451. Граничний шар 456 сходиться в струмені 454 за межами довжини FRC, забезпечуючи природний дивертор.

Головна магнітна система 410 включає в себе ряд котушок 412, 414 і 416 квазіпостійного струму, які знаходяться в конкретних осевих положеннях вздовж компонентів системи 10 FRC, тобто вздовж камери 100 утримання, формувальних секцій 200 і диверторів 300. Живлення котушок 412, 414 і 416 квазіпостійного струму здійснюється за допомогою імпульсних джерел живлення квазіпостійного струму, так що котушки створюють базові магнітні поля зміщення з індукцією приблизно 0,1 Тл в камері 100 утримання, формувальних секціях 200 і диверторах 300. Крім котушок 412, 414 і 416 квазіпостійного струму, головна магнітна система 410 включає в себе дзеркальні котушки 420 квазіпостійного струму (що живляться за допомогою імпульсних джерел живлення) між будь-яким торцем камери 100 утримання і сусідніми формувальними секціями 200. Дзеркальні котушки 420 квазіпостійного струму забезпечують коефіцієнти відбиття магнітного дзеркала до 5 і забезпечують можливість незалежного збудження для контролю надання рівноважної форми. Крім того, між кожними з формувальних секцій 200 і диверторів 300 розташовані дзеркальні пробки 440. Дзеркальні пробки 440 містять компактні дзеркальні котушки 430 квазіпостійного струму і дзеркальні пробкові котушки 444. Дзеркальні котушки 430 квазіпостійного струму включають в себе три котушки 432, 434 і 436 (що живляться за допомогою імпульсних джерел живлення), які створюють додаткові напрямні поля для націлювання поверхонь 455 магнітного потоку у напрямку до каналу 442 малого діаметра, що проходить крізь дзеркальні пробкові котушки 444. Дзеркальні пробкові котушки 444, які обвивають канал 442 малого діаметра і живляться за допомогою імпульсних силових LC-схем, створюють сильні поля магнітного дзеркала з індукцією до 4 Тл. Призначення всього цього компонування котушок полягає в тому, щоб щільно ув'язувати і спрямовувати поверхні 455 магнітного потоку і струмені 454 плазми, які течуть до торця, у віддалені камери 310 диверторів 300. І, нарешті, ззовні камери 100 утримання розташований набір "антен" 460 на основі відхильних котушок (див. фіг. 15), по дві з кожної сторони середньої площини, які живляться за допомогою джерел живлення постійного струму. Конфігурація антен 460 на основі відхильних котушок може забезпечувати квазістатичне магнітне дипольне або квадрупольне поле з індукцією приблизно 0,01 Тл для контролю нестійкості обертання і/або контролю електронного струму. Антени 460 на основі відхильних котушок можуть гнучко забезпечувати магнітні поля, що є або симетричними, або антисиметричними відносно середньої площини машини, залежно від напрямку прикладаних струмів.

Формувальні системи імпульсного живлення

Формувальні системи 210 імпульсного живлення працюють за принципом модифікованого тета-пінча. Є дві системи, кожна з яких живить одну з формувальних секцій 200. На фіг. 4-6 ілюструються головні складові блоки і розташування формувальних систем 210. Формувальна система 210 складається з модульної конструкції імпульсного живлення, яка складається з окремих блоків (модулів) 220, кожний з яких збуджує піднабір котушок 232 (підвісок) вузла 230 підвіски, які обвиті

навколо формувальних кварцових труб 240. Кожний модуль 220 складається з конденсаторів 221, індукторів 223, швидкодіючих сильноточових перемикачів 225 і зв'язаних з ними схем 222 запуску і 224 скидання заряду. Кожна формувальна система 210 запасає ємнісну енергію в діапазоні 350-400 кДж, яка забезпечує до 35 ГВт потужності для формування і прискорення FRC. Координована робота цих компонентів досягається за допомогою відомої системи 222 і 224 запуску і керування, яка забезпечує синхронізацію між формувальними системами 210 на кожній формувальній секції 200 і мінімізує нестійку синхронізацію перемикачів, обмежуючи її десятками наносекунд. Перевагою цієї модульної конструкції є гнучка робота: FRC можуть бути формовані на місці, а потім прискорені й інжектвані (= статичне формування), або сформовані і прискорені одночасно (= динамічне формування).

Інжектори пучків нейтральних частинок

Пучок 600 нейтральних атомів розгортають у системі 10 FRC, щоб забезпечити нагрівання і збудження струму, а також розвинути тиск швидких частинок. Як показано на фіг. 3А, 3В і 8, окремі тракти пучків, що містять системи 610 і 640 інжекції пучків нейтральних атомів, розташовані навколо центральної камери 100 утримання та інжектують швидкі частинки в плазму FRC тангенційно (і перпендикулярно або під прямим кутом до основної осі симетрії центральної ємності 100 для утримання) з деяким параметром прицілювання, так що цільова зона захоплення лежить у межах сепаратиси 451 (див. фіг. 2). Кожна система 610 і 640 інжекції здатна інжектувати пучки нейтральних частинок потужністю до 1 МВт у плазму FRC з енергіями частинок в діапазоні між 20 і 40 кеВ. Системи 610 і 640 основані на багатоапертурних джерелах виділення позитивних іонів і передбачають використання геометричного фокусування, інерційного охолодження іоновидільних решіток і диференційної відкачки. Крім використання різних джерел плазми, системи 610 і 640 відрізняються головним чином за відповідністю їхньої фізичної конструкції відповідним місцям їх встановлення, надаючи можливості інжекції збоку і зверху. Типові компоненти цих інжекторів пучків нейтральних частинок ілюструються, зокрема, на фіг. 7 для систем 610 інжекції збоку. Як показано на фіг. 7, кожна окрема система 610 інжекції пучків нейтральних частинок збоку включає в себе джерело 612 високочастотної (RF) плазми на вхідному торці (що замінюється дуговим джерелом у системах 640) з магнітним екраном 614, який накриває цей торець. З джерелом 612 плазми пов'язаний блок 616, який включає в себе оптичне джерело іонів і прискорювальні сітки, а запірний клапан 620 розташований між блоком 616, який включає в себе оптичне джерело іонів і прискорювальні сітки, і нейтралізатором 622. Відхильний магніт 624 і поглинач 628 іонів знаходяться між нейтралізатором 622 і націлювальним пристроєм 630 на вихідному торці. Система охолодження містить дві криогенні холодильні машини 634, дві криопанелі 636 і кожух 638 з охолодженням рідким азотом. Ця універсальна конструкція забезпечує роботу в широкому діапазоні параметрів FRC.

Альтернативною конфігурацією для інжекторів 600 пучків нейтральних атомів є конфігурація, яка забезпечує тангенційну інжекцію швидких частинок у плазму FRC, але під кутом A менше 90° відносно головної осі симетрії центральної ємності 100 для утримання. Ці типи орієнтації інжекторів 615 пучків показані на Фіг. 3С. Крім того, інжектори 615 пучків можуть бути орієнтовані так, що інжектори 615 пучків на будь-якій стороні середньої площини центральної ємності 100 для утримання будуть інжектувати свої частинки до середньої площини. І, нарешті, осьове положення цих систем 600 пучків можна вибрати ближче до середньої площини. Ці альтернативні варіанти здійснення інжекції втілюють "більш центрований" варіант поповнення, який забезпечує кращий зв'язок пучків і більш високу ефективність захоплення інжектованих швидких частинок. Крім цього, залежно від кута і осьового положення, це розташування інжекторів 615 пучків забезпечує більш безпосередній і незалежний контроль осьового подовження і інших характеристик FRC 450. Наприклад, інжекція пучків під малим кутом A відносно головної осі симетрії згаданої ємності приведе до створення плазми FRC зі збільшеним осьовим подовженням і зниженою температурою, тоді як підбір "більш прямого" кута A приведе до плазми, яка коротше в осьовому напрямку, але більш гаряча. Таким чином, кут A інжекції і місцеположення інжекторів 615 пучків можна оптимізувати для різних цілей. На доповнення до цього, таке регулювання кута установки і місцеположення інжекторів 615 пучків може забезпечити пучок підвищеної енергії (що в загальному випадку сприятливіше для впливу більшою потужністю з меншим розходженням пучків), які повинні бути інжектвані в більш слабкі магнітні поля, ніж були б необхідні в іншому випадку для захоплення таких пучків. Причина цього пов'язана з азимутальною складовою енергії, яка визначає масштаб орбіт швидких іонів (який виявляється поступово зменшуваним в міру зменшення кута інжекції відносно головної осі симетрії згаданої ємності при постійній енергії пучків). Крім того, похила інжекція до середньої площини і з осьовими положеннями пучків, близькими до середньої площини, поліпшує зв'язок "пучок-плазма" навіть тоді, коли плазма FRC скорочується або іншим чином стискається в осьовому напрямку протягом періоду інжекції.

Звертаючись до фіг. 3D і 3E, зазначаємо, що ще одна альтернативна конфігурація системи 10 FRC включає в себе внутрішні дивертори 302 на доповнення до інжекторів 615 похилих пучків. Внутрішні дивертори 302 розташовані між формувальними секціями 200 і камерою 100 утримання і виконані і працюють практично аналогічно зовнішнім диверторам 300. Внутрішні дивертори 302, які включають в

себе швидкі перемикаючі магнітні котушки, по суті, неактивні під час процесу формування, щоб дозволити формувальним FRC пройти через внутрішні дивертори 302, коли формувальні FRC переміщуються до середньої площини камери 100 утримання. Після проходження формувальних FRC через внутрішні дивертори 302 в камеру 100 утримання внутрішні дивертори активуються для роботи, по суті, аналогічно зовнішнім диверторам та ізолюють камеру 100 утримання від формувальних секцій 200.

Інжектор таблеток

Щоб забезпечити засіб для інжекції нових частинок і кращого контролю загальної кількості частинок FRC, в системі 10 FRC використовується 12-тистовольний інжектор 700 таблеток (див., наприклад, I. Vinyar et al, "Pellet Инжекторов Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A," Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27-10/01 (2010)). Фіг. 3 ілюструє схему розташування інжектора 700 таблеток у системі 10 FRC. Циліндричні таблетки ($D \sim 1$ мм, $L \sim 1-2$ мм) інжектуються в FRC зі швидкістю в діапазоні 150-250 км/с. Кожна окрема таблетка містить приблизно 5×10^{19} атомів водню, що порівняно із загальною кількістю частинок FRC.

Системи гетерування

Добре відомо, що нейтральний галоїдний газ є серйозною проблемою у всіх системах утримання. Процеси обміну зарядами і рециркуляції (вивільнення холодного примісного матеріалу зі стінки) можуть здійснювати згубний вплив на утримання енергії і частинок. Крім того, будь-яка значна густина нейтрального газу на межі або поблизу неї приведе до швидких втрат або щонайменше значного скорочення часу життя інжектіваних частинок великої орбіти (високої енергії) (термін "велика орбіта" стосується частинок, що мають орбіти в масштабі топології FRC або щонайменше радіуси орбіти, що набагато перевищують масштаб характерної довжини градієнта магнітного поля) - факт, який завдає збитку всім енергетичним застосуванням плазми, включаючи синтез через додаткове нагрівання пучка.

Кондиціонування поверхонь є засобом, за допомогою якого можна боротися зі згубними впливами нейтрального газу і домішок або зменшувати ці впливи в системі для утримання. З цією метою, в пропонованій тут системі 10 FRC використовуються системи 810 і 822 осадження титану і літію, які покривають обернені до плазми поверхні камери 100 утримання (або ємності для утримання) і диверторів 300 плівками Ti і/або Li (товщина яких становить десятки мікрометрів). Ці покриття наносяться методами осадження з парової фази. Твердий Li і/або Ti випаровуються і/або сублімуються і напильються на сусідні поверхні, утворюючи покриття. Джерелами є ядерні печі 822 з напрямними соплами (у випадку Li) або нагріті сфери твердої речовини з напрямними бандажами 812 (у випадку Ti). Системи для випаровування Li, як правило, працюють у перервах між роботою з плазмою. Робочі температури цих систем перевищують 600 °C для отримання великих швидкостей осадження. Щоб досягнути прийнятного покриття стінок, необхідні множинні стратегічно локалізовані системи випаровування і/або сублімації. На фіг. 9 детально ілюструється переважне розташування систем 810 і 820 осадження шляхом гетерування в системі 10 FRC. Покриття діють як гетерувальні поверхні і ефективно відкачують нейтральні атоми й атомарні іони загалом, а також молекулярні іони і нейтральні молекули (H і D) загалом. Ці покриття також знижують вміст інших типових домішок, таких, як вуглець і кисень, до незначних рівнів.

Дзеркальні пробки

Як указано вище, в системі 10 FRC застосовуються набори дзеркальних котушок 420, 430 і 444, показаних на фіг. 2 і 3. Перший набір дзеркальних котушок 420 знаходиться на двох осьових торцях камери 100 утримання і незалежно збуджується від утримувальної, формувальної і диверторної котушок 412, 414 і 416 головної магнітної системи 410. Перший набір дзеркальних котушок 420 сприяє головним чином керуванню й утриманню в осьовому напрямку FRC 450 під час об'єднання і забезпечує контроль надання рівноважної форми під час утримання. Перший набір 420 дзеркальних котушок створює магнітні поля з номінально більшою індукцією (приблизно 0,4-0,5 Тл), ніж у центрального утримувального поля, що створюється центральною утримувальною котушкою 412. Другий набір дзеркальних котушок 430, який включає в себе три компактні дзеркальні котушки 432, 434 і 436 квазіпостійного струму, знаходиться між формувальними секціями 200 і диверторами 300 і збуджується за допомогою загального імпульсного джерела живлення. Дзеркальні котушки 432, 434 і 436 разом з більш компактними імпульсними дзеркальними пробковими котушками 444 (що живляться за допомогою ємнісного джерела живлення) і фізичним звуванням 442 утворюють дзеркальні пробки 440, які забезпечують вузький тракт з низькою електропровідністю газу і магнітними полями з дуже високою індуктивністю (в діапазоні 2-4 Тл при часах наростання приблизно 10-20 мс). Найбільш компактні імпульсні дзеркальні котушки 444 мають компактні радіальні розміри - розточений отвір діаметром 20 см і аналогічну довжину - порівняно з плоскою конструкцією, що передбачає висвердлені отвори з плюсовими метричними допусками утримувальних котушок 412, 414 і 416. Призначення дзеркальних пробок 440 багатозначне. (1) Котушки 432, 434, 436 і 444 щільно ув'язують і направляють

поверхні 455 магнітного потоку і струмені 454 плазми, які течуть до торця, у віддалені камери 310 диверторів. Це передбачає, що частинки, які випускаються, досягають диверторів 300 належним чином і що є поверхні 455 безперервного потоку, які виходять з ділянки незамкнених силових ліній 452 поля центральної FRC 450 на всьому шляху до диверторів. (2) Фізичні звуження 442 в системі 10 FRC, через які згадані котушки 432, 434, 436 і 444 дають можливість пройти поверхням 455 магнітного потоку і струменям 454 плазми, ускладнюють протікання нейтрального газу з плазових гармат 350, які сидять в диверторах 300. Подібним же чином, звуження 442 запобігають зворотному протіканню газу від формувальних секцій 200 до диверторів 300, тим самим зменшуючи кількість нейтральних частинок, які доводиться вводити у всю систему 10 FRC на початку запуску FRC. (3) Суворі осьові дзеркала, що утворюються котушками 432, 434, 436 і 444, зменшують осьові втрати частинок і тим самим знижують здатність частинок до паралельної дифузії по незамкнених силових лініях поля.

В альтернативній конфігурації, показаній на фіг. 3D і 3E, набір низькопрофільних обтискних котушок 421 являє собою положення між внутрішніми диверторами 302 і формувальними секціями 200.

Осьові плазові гармати

Потоки плазми з гармат 350, встановлених у камерах 310 диверторів 300, призначені для поліпшення робочих характеристик стійкості і пучків нейтральних частинок, як зображено на фіг. 3 і 10, і отримання плазми, що тече вздовж незамкнених ліній 452 потоку в дивертор 300 і у напрямку до центральної камери 100 утримання. Гармати 350 працюють при високогустому газовому розряді в каналі з пакету шайб і призначені для генерування декількох тисяч ампер повністю іонізованої плазми протягом 5-10 мс. Гармати 350 включають в себе імпульсну магнітну котушку, яка узгоджує вихідний потік плазми з бажаними розмірами плазми в камері 100 утримання. Технічні параметри гармат 350 характеризуються каналом, що має зовнішній діаметр 5-13 см і внутрішній діаметр до приблизно 10 см, і забезпечують розрядний струм 10-15 кА при 400-600 В за допомогою внутрішнього магнітного поля гармати, що має індукцію в діапазоні від 0,5 до 2,3 Тл.

Потоки плазми з гармат можуть пронизувати магнітні поля дзеркальних пробок 440 і текти у формувальну секцію 200 і камеру 100 утримання. Ефективність перенесення плазми через дзеркальні пробки 440 збільшується зі зменшення відстані між гарматами 350 і пробками 440, а також з розширенням і укороченням пробок 440. У прийнятних умовах, кожна з гармат 350 може постачати приблизно 1022 протони на секунду через дзеркальні пробки 440 з індуктивністю 2-4 Тл при високих температурах іонів і електронів, що становлять приблизно 150-300 еВ і приблизно 40-50 еВ, відповідно. Гармати 350 забезпечують значне поповнення граничного шару 456 FRC і поліпшене загальне утримання частинок за допомогою FRC.

Щоб додатково підвищити густину плазми, можна було б використовувати газосепаратор для відгону додаткового газу в потік плазми з гармат 350. Цей метод забезпечує збільшення густини інжектваної плазми в декілька разів. Газосепаратор, встановлений в системі 10 FRC на оберненій до диверторів 300 стороні дзеркальних пробок 440, поліпшує поповнення граничного шару 456 FRC, формування FRC 450 і лінійне зв'язування плазми.

Задаючись всіма регульованими параметрами, розглянутими вище, а також враховуючи можливість роботи лише з однією або двома гарматами, легко зрозуміти, що доступний широкий спектр робочих режимів.

Зміщувальні електроди

Електричне зміщення незамкнених поверхонь потоку може забезпечити радіальні потенціали, які приводять до азимутального руху, $E \times B$, що забезпечує механізм керування, аналогічний повороту ручки, для керування обертанням лінійної плазми незамкнутого поля, а також фактичною активною зоною 450 FRC за допомогою розриву швидкості. Щоб досягнути цього керування, в системі 10 FRC застосовуються різні електроди, стратегічно розміщені в різних частинах машини. Фіг. 3 ілюструє зміщувальні електроди, розташовані в переважних місцях у межах системи 10 FRC.

У принципі, існують 4 класи електродів: (1) точкові електроди 905 в камері 100 утримання, які вступають у контакт з конкретними незамкнутими силовими лініями 452 поля на межі FRC 450, забезпечуючи локальне заряджання; (2) кільцеві електроди 900 між камерою 100 утримання і формувальними секціями 200, призначені для азимутально-симетричного заряджання віддалених від меж шарів 456 потоку; (3) пакети концентричних електродів 910 у диверторах 300 для заряджання множинних концентричних шарів 455 потоку (внаслідок чого вибором шарів можна керувати за допомогою регулювання котушок 416 з метою регулювання магнітного поля диверторів так, щоб завершувати бажані шари 456 потоку на належних електродах 910); і, нарешті, (4) аноди 920 (див. фіг. 10) самих плазових гармат 350 (які перехоплюють незамкнуті внутрішні поверхні 455 поля біля сепаратрис FRC 450). На фіг. 10 і 11 показані деякі типові конструкції деяких електродів.

У всіх випадках, ці електроди збуджуються за допомогою імпульсних джерел живлення або джерел живлення постійного струму при напругах приблизно до 800 В. Залежно від розмірів електродів і місць, де ті перерізають поверхні потоку, виявляється можливим споживання струмів у кілоамперному діапазоні.

Непідтримувана робота системи FRC - звичайний режим

Стандартне формування плазми в системі 10 FRC слідує добре розробленому методу тета-пінча із оберненим полем. Типовий процес запуску FRC починається збудженням котушок 412, 414, 416, 420, 432, 434 і 436 квазіпостійного струму для роботи в усталеному стані. Потім ланцюги імпульсної потужності формувальних систем 210 імпульсного живлення, призначені для створення високочастотної термічної плазми, збуджують котушки 232 збудження імпульсного швидко обертального магнітного поля, створюючи тимчасове оборотне зміщення приблизно $-0,05$ Тл у формувальних секціях 200. У цей момент в два формувальні об'єми, обмежені камерами 240 в формі кварцових труб (північної і південної) формувальних секцій 200, інжектують попередньо задану кількість нейтрального газу при 9-20 фн/кв.д (фунтів на квадратний дюйм) через множину азимутально-орієнтованих продувальних клапанів у фланцях, які знаходяться на зовнішніх торцях формувальних секцій 200. Потім з набору антен на поверхні кварцових труб 240 генерують поле на малих високих частотах ($\sim$ сотні кілогерц), створюючи попередню іонізацію у формі ділянок локальної початкової іонізації в межах стовпів нейтрального газу. За цим слідує застосування тета-кільцевої модуляції до струму, що збуджує котушки 232 збудження імпульсного швидко обертального магнітного поля, що приводить до більш загальної попередньої іонізації стовпів газу. На закінчення, заживлюють основні імпульсні джерела живлення формувальних систем 210 імпульсного живлення для збудження котушок 232 збудження імпульсного швидко обертального магнітного поля, створюючи поле з прямим зміщенням та індуктивністю до $0,4$ Тл. Цей етап можна проводити в такій послідовності у часі, що по всій довжині кварцових труб 240 рівномірно генерується поле з прямим зміщенням (статичне формування) або досягається послідовна перистальтична модуляція поля вздовж осі формувальних труб 240 (динамічне формування).

У всьому цьому процесі формування фактичне обернення поля в плазмі відбувається швидко в межах приблизно 5 мкс. Багатогігаватна імпульсна потужність, що підводиться до формованої плазми, легко створює гарячі FRC, які потім ежектуються із формувальних секцій 200 за допомогою застосування або послідовно здійснюваної у часі модуляції магнітного поля в передньому напівпросторі (магнітна перистальтика), або тимчасово збільшених струмів в останній котушці з наборів 232 котушок біля осьових зовнішніх торців формувальних труб 210 (формування осьового градієнта магнітного поля, який обернений в осьовому напрямку до камери 100 утримання). Обидві формувальні FRC (північна і південна), які сформовані таким чином і прискорилися, потім розширюються в камеру 100 утримання, що має більший діаметр, де котушки 412 квазіпостійного струму створюють поле з прямим зміщенням для керування радіальним розширенням і забезпечення рівноважного зовнішнього магнітного потоку.

Як тільки північна і південна формувальні FRC прибувають в околицю середньої площини камери 100 утримання, ці FRC зіштовхуються. Осьові кінетичні енергії під час зіткнення північної і південної формувальних FRC переважно термалізуються, оскільки FRC, зрештою, об'єднуються в єдину FRC 450. У камері 100 утримання можливий великий набір методів діагностики плазми для вивчення рівноваги FRC 450. Типові робочі умови в FRC-системі 10 дають складову FRC з радіусами сепаратиси приблизно $0,4$ м і осьовою протяжністю приблизно 3 м. Додатковими характеристиками є зовнішні магнітні поля з індуктивністю приблизно $0,1$ Тл, густини плазми приблизно 5×10^{19} м³ і повною температурою плазми до 1 кеВ. Без якої-небудь підтримки, тобто, за відсутності нагрівання і/або збудження струму за допомогою інжекції пучків нейтральних частинок або інших допоміжних засобів, час життя цих FRC, тобто час розпаду корінної характеристичної конфігурації, обмежується величиною приблизно 1 мс.

Експериментальні дані непідтримуваної роботи - звичайний режим

На фіг. 12 показана типова еволюція у часі радіуса $r_{\Delta\Phi}$ потоку, що виключається, який апроксимує радіус r_c сепаратиси, для ілюстрації динаміки процесу об'єднання FRC 450, що відбувається в тета-пінчі. Обидва індивідуальні плазмоди (північний і південний) створюються одночасно, а потім прискорюються, виходячи з відповідних формувальних секцій 200 з надзвуковою швидкістю $v_z \sim 250$ км/с, і зіштовхуються поблизу середньої площини при $z=0$. Під час зіткнення плазмоди піддаються осьовому стисненню, за яким слідує швидке радіальне і осьове розширення, перш ніж, зрештою, об'єднатися, утворюючи одну FRC 450. Про наявність як радіальної, так і осьової динаміки, свідчать детальні вимірювання профілю густини і томографія на основі болометра.

Дані, отримані внаслідок непідтримуваного розряду, системи 10 FRC показані як функції часу на фіг. 13A, 13B, 13C і 13D. FRC ініціюється в момент $t=0$. Радіус потоку, що виключається, в середній вздовж осі площині машини показаний на фіг. 13A. Ці дані отримані з матриці магнітних зондів, які розміщені трохи зсередини від виконаної з нержавіючої сталі стінки камери утримання і вимірюють осьове магнітне поле. Сталева стінка є хорошим засобом збереження потоку у часових рамках цього розряду.

На фіг. 13B показані лінійно інтегровані густини, отримані з інтерферометра, який працює по 6 хордах, для визначення вмісту $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$, розташованого в $z=0$. З урахуванням вертикального

переміщення (y) FRC, що вимірюється за допомогою болометричної томографії, інверсія за Абелем дає профілі розподілу густини згідно з фіг. 13C. Після деякого осьового і радіального коливання протягом першої 0,1 мс, встановлюється FRC з деяким "порожнистим" профілем густини. Цей профіль є достатньо плоским, з істотною густиною на осі, як вимагають рівноваги в типових плоских FRC.

На фіг. 13(D) показана повна температура плазми, яка виведена, виходячи з рівності тисків, і повністю відповідає розсіянню за Томпсоном і спектроскопічним вимірюванням.

Аналіз всього масиву даних потоку, що виключається, вказує на те, що форма сепаратиси FRC (що наближається осьовими профілями потоку, що виключається) поступово еволюціонує від колової до еліптичної. Ця еволюція, показана на фіг. 14, узгоджується з поступовим магнітним перемиканням з переходом від двох FRC до однієї. Дійсно, грубі оцінки дозволяють передбачити, що в цьому конкретному випадку під час зіткнення перезамикаються приблизно 10 % магнітних потоків двох первинних FRC.

Довжина FRC монотонно скорочується з 3 м до приблизно 1 м протягом часу життя FRC. Це скорочення, видне на фіг. 14, передбачає, що при утриманні FRC домінують головним чином конвективні втрати енергії. Оскільки тиск плазми зсередини від сепаратиси зменшується швидше, ніж магнітний тиск ззовні, натягнення силових ліній магнітного поля в торцевих ділянках приводить до осьового стиснення FRC, відновлюючи осьову і радіальну рівновагу. Для розряду, що розглядається в зв'язку з фіг. 13 і 14, зазначимо, що магнітний потік, загальна кількість частинок і тепла енергія FRC (приблизно 10 мВб, 7×10^{19} частинок і 7 кДж, відповідно) зменшуються, грубо кажучи, на порядок величини за першу мілісекунду, коли виявляється зникнення рівноваги FRC.

Підтримувана робота - режим HPF

На фіг. 12-14 наведені приклади, які характеризують руйнування FRC без якої-небудь підтримки. Водночас, в системі 10 FRC застосовуються декілька методів для подальшого поліпшення утримання FRC (внутрішньої активної зони і граничного шару) для досягнення режиму HPF і підтримки конфігурації.

Пучок нейтральних частинок

Спочатку швидкі нейтральні частинки (H) у вигляді пучків інжектуються з восьми інжекторів 600 пучків нейтральних частинок перпендикулярно B_z . Пучки швидких нейтральних частинок інжектуються з моменту об'єднання північної і південної формувальних FRC в камері 100 утримання в одну FRC 450. Швидкі іони, що створюються головним чином за допомогою обміну зарядами, мають бетатронні орбіти (з первинними радіусами в межах топології FRC або щонайменше такими, що значно перевищують характеристичний лінійний масштаб довжини градієнта магнітного поля), які сприяють азимутальному струму FRC 450. Після проходження деякої частки розряду (через 0,5-0,8 мс на імпульс), достатньо велика популяція швидких іонів значно поліпшує властивості внутрішньої стійкості і утримання FRC (див., наприклад, M. W. Binderbauer and N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)). Крім того, з перспективи підтримки витікає, що пучки з інжекторів 600 пучків нейтральних частинок також є первинними засобами збудження струму і нагрівання плазми FRC.

У режимі плазми системи 10 FRC швидкі іони сповільнюються насамперед на електронах плазми. Протягом ранньої частини розряду типові усереднені по орбітах часи сповільнення швидких іонів становлять 0,3-0,5 мс, що приводить до значного нагрівання FRC, насамперед, електронами. Швидкі іони здійснюють великі радіальні екскурси назовні від сепаратиси, тому що внутрішнє магнітне поле FRC за своєю природою має малу індукцію (в середньому, приблизно 0,03 Тл для зовнішнього осьового поля з індукцією 0,1 Тл). Швидкі іони були б схильні до втрат при обміні зарядами, якби густина нейтрального газу ззовні від сепаратиси була дуже великою. Тому гетеровані стінки й інші методи (такі, як ті, що передбачають використання плазмової гармати 350 і дзеркальних пробок 440, які, крім всього іншого, роблять внесок у контроль газу), що використовуються в системі 10 FRC, демонструють тенденцію до мінімізації граничних нейтральних частинок і забезпечують необхідне наростання струму, зумовленого швидкими іонами.

Інжекція таблеток

Коли у межах FRC 450 зростає значна популяція швидких іонів і при цьому температури електронів є підвищеними, а часи життя FRC збільшеними, в FRC 450 інжектують заморожені таблетки H або D з інжектора 700 таблеток, щоб підтримати загальну кількість частинок у FRC, необхідну для FRC 450. Передбачувані часові інтервали абляції є достатньо короткими, щоб забезпечити джерело значної кількості частинок для FRC. Ця швидкість також може бути збільшена завдяки збільшенню площі поверхні інжектованого шматочка шляхом розламування окремої таблетки на менші фрагменти, коли вони знаходяться в стволах або інжекційних трубах інжектора 700 таблеток і до того, як вони потрапляють у камеру 100 утримання - етап, який можна втілити шляхом збільшення тертя між таблеткою і стінками інжекційної труби завдяки зменшенню радіуса вигину останнього сегмента інжекційної труби безпосередньо перед входом в камеру 100 утримання. Шляхом зміни послідовності і швидкості стрільби з 12 стволів (інжекційних труб), а також фрагментації, можна налаштувати систему 700 інжекції таблеток на забезпечення якраз бажаного рівня підтримки загальної кількості частинок. Своєю чергою, це сприяє збереженню внутрішнього кінетичного тиску в FRC 450, а

також підтримуваної роботи і часу життя FRC 450.

Як тільки піддані абляції атоми зустрічаються зі значною кількістю плазми в FRC 450, вони стають повністю іонізованими. Потім частина холодної плазми, що виходить в результаті, нагрівається при зіткненні із власною плазмою FRC. Енергія, необхідна для збереження бажаної температури FRC, зрештою, підводиться інжекторами 600 пучків. У цьому значенні, інжектори 700 таблеток разом з інжекторами 600 пучків нейтральних частинок утворюють систему, яка зберігає сталий стан FRC 450 і підтримує її.

Інжектор СТ

Як альтернатива інжектору таблеток, пропонується інжектор компактних тороїдів (СТ), в основному, для поповнення плазми обернених магнітних конфігурацій (FRC). Інжектор 720 СТ містить намагнічену коаксіальну плазмову гармату (MCPG), яка, як показано на фіг. 22A і 22B, включає в себе коаксіальні циліндричні внутрішній і зовнішній електроди 722 і 724, котушку 726 зміщення, розташовану всередині внутрішнього електрода, і електричний розрив 728 на кінці, протилежному випуску інжектора 720 СТ. Газ інжекується через отвір 730 для інжекції газу в простір між внутрішнім і зовнішнім електродами 722 і 724, і плазма типу сферомаку генерується з нього шляхом розрядження і виштовхується з гармати силою Лоренца. Як показано на фіг. 23A і 23B, пара інжекторів 720 СТ зв'язані з ємністю 100 для утримання поблизу і по протилежних сторонах середньої площини ємності 100 для інжекції СТ в центральну плазму FRC в межах посудини 100 для утримання. Випускний кінець інжекторів 720 СТ спрямований до середньої площини ємності 100 для утримання під кутом до подовжньої осі ємності 100 для утримання, аналогічно інжекторам 615 пучків нейтральних частинок.

У альтернативному варіанті здійснення інжектор 720 СТ, як показано на Фіг. 24A і 24B, включає в себе дрейфову трубу 740, яка містить витягнуту циліндричну трубу, зв'язану з випускним кінцем інжектора 720 СТ. Як показано, дрейфова труба 740 включає в себе котушки 742 дрейфової труби, розташовані навколо і аксіально рознесені вздовж труби. Вздовж довжини труби зображена множина діагностичних отворів 744.

Переваги інжектора 720 СТ: (1) контроль і регульованість загальної кількості частинок на інжекований СТ; (2) осаджується тепла плазма (замість криогенних таблеток); (3) система може працювати в режимі частоти повторення, щоб забезпечити безперервне завантаження; (4) система також може відновлювати деякий магнітний потік, оскільки інжековані СТ несуть вбудоване магнітне поле. У варіанті здійснення для експериментального використання внутрішній діаметр зовнішнього електрода становить 83,1 мм, а зовнішній діаметр внутрішнього електрода становить 54,0 мм. Поверхня внутрішнього електрода 722 переважно покрита вольфрамом, щоби зменшити домішки, які виходять з електрода 722. Як показано, котушка 726 зміщення встановлена всередині внутрішнього електрода 722.

У нещодавніх експериментах була досягнута надзвукова швидкість поступального переміщення СТ аж до ~ 100 км/с. Іншими типовими параметрами плазми є наступні: густина електронів $\sim 5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, температура електронів $\sim 30\text{-}50$ еВ і загальна кількість частинок $\sim 0,5\text{-}1,0 \times 10^{19}$. Високий кінетичний тиск СТ дозволяє інжекованій плазмі проникати глибоко в FRC і осаджувати частинки зсередини від сепаратиси. У нещодавніх експериментах завантаження частинок FRC дало такий результат, що $\sim 10\text{-}20$ % загальної кількості частинок FRC, що забезпечується інжекторами СТ, які успішно демонструють поповнення, може бути легко проведене без порушення плазми FRC.

Відхильні котушки

Для досягнення збудження струму в усталеному стані і збереження необхідного струму іонів бажано запобігати або значно зменшувати спрямовані вгору спіни електронів, зумовлені силою тертя між електронами й іонами (що є результатом перенесення імпульсу іонно-електронного зіткнення). Система 10 FRC використовує інноваційну методику для забезпечення електронного розриву через прикладане ззовні статичне магнітне дипольне або квадрупольне поле. Це досягається за допомогою зовнішніх відхильних котушок 460, зображених на фіг. 15. Поперечно прикладене радіальне магнітне поле від відхильних котушок 460 індукує осьове електричне поле в обертовій плазмі FRC. Результируючий осьовий струм електронів взаємодіє з радіальним магнітним полем, створюючи азимутальний розривний вплив на електрони $F_{\theta} = -\sigma V_{\theta e} < |B_r|^2 >$. Для типових умов в системі 10 FRC необхідне прикладане магнітне дипольне (або квадрупольне) поле всередині плазми повинне бути лише близько 0,001 Тл для забезпечення адекватного електронного розриву. Відповідне зовнішнє поле величиною приблизно 0,015 Тл є достатньо слабким, щоби викликати помітні втрати швидких частинок або іншим чином негативно впливати на утримання. Фактично, прикладане магнітне дипольне (або квадрупольне) поле сприяє пригніченню нестійкості. У комбінації з тангенційною інжекцією пучків нейтральних частинок і осьовою інжекцією плазми відхильні котушки 460 забезпечують додатковий рівень контролю відносно збереження струму і стійкості.

Дзеркальні пробки

Конструкція імпульсних котушок 444 в межах дзеркальних пробок 440 допускає локальну генерацію сильних магнітних полів (від 2 до 4 Тл) за допомогою невеликої (приблизно 100 кДж)

ємнісної енергії. При формуванні магнітних полів, типових для експлуатації пропонуваної системи 10 FRC, всі силові лінії поля в межах формувального об'єму проходять через звуження 442 біля дзеркальних пробок 440, як це передбачається силовими лініями магнітного поля на фіг. 2, і контакт плазми зі стінкою не відбувається. Крім того, дзеркальні пробки 440 спільно з диверторними магнітами 416 квазіпостійного струму можуть бути відрегульовані так, щоб спрямовувати силові лінії на диверторні електроди 910 або виставляти силові лінії в конфігурації торцевих виступів (не показана). Остання підвищує стійкість і пригнічує паралельну теплопровідність електронів.

Дзеркальні пробки 440 самі по собі також сприяють контролю нейтрального газу. Дзеркальні пробки 440 дозволяють краще використовувати дейтерієвий газ, що вдується в кварцові труби під час формування FRC, оскільки потік газу, який тече назад в дивертори 300, значно зменшується завдяки малій здатності пробок пропускати газ (що становить скромні 500 л/с). Велика частина залишкового газу, що продувається всередині формувальних труб 210, швидко іонізується. Крім того, високогуста плазма, яка протікає через дзеркальні пробки 440, забезпечує ефективну іонізацію нейтральних частинок, а отже - і ефективний газовий бар'єр. У результаті, більшість нейтральних частинок, рециркульованих в диверторах 300 із граничного шару 456 FRC, не повертається в камеру 100 утримання. Крім того, нейтральні частинки, пов'язані з роботою плазмових гармат 350 (як обговорюється нижче), будуть в основному утримуватися в диверторах 300.

Нарешті, дзеркальні пробки 440 мають тенденцію поліпшувати утримання граничного шару FRC. З коефіцієнтами відбиття дзеркала (пробка/магнітні поля утримання) в діапазоні від 20 до 40 і при довжині 15 м між північною і південною дзеркальними пробками 440, час $t_{||}$ утримання частинок граничного шару збільшується на порядок величини. Поліпшення $t_{||}$ легко збільшує утримання частинок FRC.

Передбачаючи, що зумовлювані радіальною дифузією (D) втрати частинок з обмеженого сепаратрисою об'єму 453 балансуються осьовими втратами ($t_{||}$) з граничного шару 456, отримуємо $(2\pi r_c L_c)(Dn_c/\delta) = (2\pi r_c L_c \delta)(n_c/t_{||})$, звідки слідує, що довжину градієнта густини у сепаратрисі можна переписати у вигляді $\delta = (Dt_{||})^{1/2}$. Тут r_c , L_c і n_c - це радіус сепаратрисі, довжина сепаратрисі і густина у сепаратрисі, відповідно. Час утримання частинок в FRC становить $t_N = [\pi r_c^2 L_c \langle n \rangle] / [(2\pi r_c L_c)(Dn_c/\delta)] = (\langle n \rangle / n_c)(t_{\perp} t_{||})^{1/2}$, де $t_{\perp} = a^2/D$ і при цьому $a = r_c/4$. Фізично, збільшення $t_{||}$ веде до збільшеного δ (зменшеного градієнту густини і параметру дрейфу у сепаратрисі), а значить - і до зменшених втрат частинок в FRC. Загальне збільшення параметра утримання частинок в FRC звичайно трохи менше, ніж квадратичне, оскільки n_c збільшується разом з $t_{||}$.

Значне поліпшення $t_{||}$ також вимагає того, щоб граничний шар 456 залишався за великим рахунком стійким (тобто щоб при $n=1$ не було жолобкової, рукавної або іншої MHD-нестійкості, характерної для незамкнених систем). Використання плазмових гармат 350 забезпечує цю переважну граничну стійкість. У цьому значенні дзеркальні пробки 440 і плазмова гармата 350 утворюють ефективну систему контролю межі.

Плазмові гармати

Плазмові гармати 350 поліпшують стійкість струменів 454 FRC, що виходять, за допомогою лінійного зв'язування. Плазми гармат, що випускаються із плазмових гармат 350, генеруються без азимутального моменту імпульсу, що виявляється корисним для боротьби з обертальними нестійкостями FRC. Таким чином, гармати 350 є ефективним засобом для керування стійкістю FRC без необхідності використання більш старого методу квадрупольної стабілізації. У результаті, плазмові гармати 350 дозволяють використовувати переваги сприятливих ефектів швидких частинок або отримати доступ до режиму вдосконаленої гібридної кінетичної FRC, як викладено в цьому винаході. Отже, плазмові гармати 350 дозволяють системі 10 FRC працювати зі струмами відхильних котушок, придатними якраз для електронного розриву, але нижче порогу, який викликав би нестійкість FRC і/або привів би до інтенсивної дифузії швидких частинок.

Як згадувалося в розглянутому вище розділі "Дзеркальні пробки", якби можна було значно збільшити $t_{||}$, то плазма, що подається з гармат, була б порівнянною зі швидкістю ($\sim 10^{22}/\text{с}$) втрат частинок у граничному шарі. Час життя отримуваної з гармат плазми в системі 10 FRC знаходиться в мілісекундному діапазоні. Дійсно, розглянемо плазму з гармат, яка має густину $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ і температуру іонів приблизно 200 eV, вміщену між торцевими дзеркальними пробками 440. Довжина L захоплення і коефіцієнт R відбиття дзеркала становлять приблизно 15 м і 20, відповідно. Середня довжина вільного пробігу іонів завдяки кулонівським зіткненням становить $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ см}$, а оскільки $\lambda_{ii} \ln R/R < L$, іони утримуються в газодинамічному режимі. Час утримання плазми в цьому режимі становить $t_{\text{сет}} \sim RL/2V_c \sim 2 \text{ мс}$, де V_c - швидкість іонного звуку. Для порівняння, класичний час утримання іонів для цих параметрів плазми становив би $t_c \sim 0,5 t_{ii} (\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0,7 \text{ мс}$. Аномальна поперечна дифузія може, в принципі, скоротити час утримання плазми. Однак, якщо передбачити, що в системі 10 FRC має місце швидкість дифузії Бома, то оцінний час поперечного утримання для плазми з гармат становить $t_{\perp} > t_{\text{сет}} \sim 2 \text{ мс}$. Отже, гармати забезпечили б значне поповнення граничного шару 456 FRC і поліпшене загальне утримання частинок FRC.

Крім того, потоки плазми гармат можуть бути включені приблизно на 150-200 мікросекунд, що дозволяє використовувати їх при запуску, поступальному переміщенні і об'єднанні FRC в камеру 100 утримання. Якщо включити приблизно в $t \sim 0$ (ініціювання основного банка FRC), плазма гармат допоможе підтримувати пропоновану динамічно сформовану і зливу FRC 450. Об'єднані загальні кількості частинок із формувальних FRC і з гармат задовільні для захоплення пучків нейтральних частинок, нагрівання плазми і тривалої підтримки. Якщо включити при t в діапазоні від -1 до 0 мс, плазма гармат може заповнити кварцові труби 210 плазмою або іонізувати газ, вдутий в кварцові труби, що дозволяє сформувати FRC зі зменшенням або навіть, можливо, нульовим вдутим газом. Останнє може потребувати достатньо холодної формувальної плазми, щоби забезпечити швидку дифузію магнітного поля зі зворотним зміщенням. Якщо включити при $t < -2$ мс, потоки плазми можуть заповнити об'єм силових ліній від 1 до 3 м³ ділянок формування і утримання формувальних секцій 200 і камери 100 утримання з цільовою густиною плазми в декілька одиниць на 10¹³ см⁻³, достатньої для забезпечення наростання пучків нейтральних частинок до прибуття FRC. Потім формувальні FRC можуть бути сформовані і поступально переміщені в результуючу плазму ємності для утримання. Таким чином, плазмові гармати 350 забезпечують широкий спектр робочих умов і режимів параметрів.

Електричне зміщення

Керування профілем радіального електричного поля в граничному шарі 456 вигідно різними способами для забезпечення стійкості й утримання FRC. Завдяки інноваційним зміщувальним компонентам, розгорнутим у системі 10 FRC, можна прикладати множину завчасно підготовлених розподілів електричних потенціалів до групи незамкнених поверхонь потоку по всій машині з ділянок далеко ззовні центральної ділянки утримання в камері 100 утримання. Таким чином, радіальні електричні поля можуть бути згенеровані через граничний шар 456, розташований відразу ж за FRC 450. Ці радіальні електричні поля потім модифікують азимутальне обертання граничного шару 456 і здійснюють його утримання через зсув швидкості $E \times B$. Будь-яке диференційне обертання між граничним шаром 456 і активною зоною 453 FRC може потім передаватися всередину плазми FRC за допомогою зсуву. У результаті, керування граничним шаром 456 безпосередньо впливає на активну зону 453 FRC. Крім того, оскільки вільна енергія при обертанні плазми також може бути причиною нестійкості, цей метод забезпечує прямий засіб для керування виникненням і ростом нестійкості. У системі 10 FRC належне граничне зміщення забезпечує ефективне керування транспортуванням вздовж і обертанням незамкнених силових ліній поля, а також обертанням активної зони FRC. Розташування і форма різних передбачених електродів 900, 905, 910 і 920 дозволяє керувати різними групами поверхонь 455 потоку і при різних і незалежних потенціалах. Таким чином, може бути реалізований широкий спектр різних конфігурацій електричних полів і напруженостей, кожна з яких має відмінний характерний вплив на робочі характеристики плазми.

Ключовою перевагою всіх цих інноваційних методів зміщення є той факт, що на поведінку плазми активної зони і межу можна впливати з місць далеко ззовні плазми FRC, тобто немає необхідності приводити які-небудь фізичні компоненти в контакт з центральною гарячою плазмою (що мало б серйозні наслідки для втрат енергії, потоку і частинок). Це має істотний сприятливий вплив на робочі характеристики і всі потенційні застосування концепції режиму HPF.

Експериментальні дані - робота в режимі HPF

Інжекція швидких частинок за допомогою пучків із гармат 600, що випускають пучки нейтральних частинок, грає важливу роль у забезпеченні режиму HPF. Фіг. 16A, 16B, 16C і 16D ілюструють цей факт. Зображений набір кривих, які показують, як час життя FRC корелюється з тривалістю імпульсів пучків. Всі інші робочі умови підтримуються незмінними для всіх розрядів, що охоплюються цим дослідженням. Дані усереднюються за багатьма імпульсами і тому відображають типову поведінку. Абсолютно очевидно, що збільшена тривалість пучків дає FRC, "які живуть довше". Вивчення цього факту, а також інших результатів діагностики протягом цього дослідження виявляє, що пучки збільшують стійкість і зменшують втрати. Кореляція між тривалістю імпульсів пучків і часом життя FRC не є досконалою, оскільки захоплення пучків стає неефективним, коли розміри плазми менше визначених, тобто коли фізичні розміри FRC 450 скорочуються і не всі інжектвані пучки перехоплюються і захоплюються. Скорочення розмірів FRC відбувається насамперед через те, що чисті втрати енергії (~4 МВт приблизно на півшляху через розряд) із плазми FRC під час розряду трохи більше, ніж загальна потужність, що підводиться в FRC за допомогою пучків нейтральних частинок (~2,5 МВт) для конкретного експериментального запуску. Розташування пучків у місці, що знаходиться ближче до середньої площини ємності 100, може привести до тенденції зменшення цих втрат і продовження часу життя FRC.

Фіг. 17A, 17B, 17C і 17D ілюструють впливи різних компонентів на досягнення режиму HPF. Тут показане сімейство типових кривих, що відображають час життя FRC 450 як функцію часу. У всіх випадках передбачається, що постійна, невелика за величиною потужність пучків (приблизно 2,5 МВт) інжектуються протягом всієї тривалості кожного розряду. Кожна крива є характерною для відмінної комбінації компонентів. Наприклад, робота системи 10 FRC без яких-небудь дзеркальних пробок 440,

плазмових гармат 350 або гетерування завдяки системам 800 гетерування приводить до швидкої появи нестійкості обертання і втрати топології FRC. Введення тільки дзеркальних пробок 440 затримує появу нестійкостей і поліпшує утримання. Використання сукупності дзеркальних пробок 440 і плазмової гармати 350 додатково зменшує нестійкості і збільшує час життя FRC. І, нарешті, введення гетерування (Ті в цьому випадку) додатково до гармати 350 і пробок 440 дає найкращі результати - в отримуваний FRC немає нестійкостей, і вона демонструє саме тривалий час життя. З цієї експериментальної демонстрації зрозуміло, що вся сукупність компонентів дає найкращий ефект і забезпечує пучки з найкращими розрахунковими умовами.

Як показано на фіг. 1, новий виявлений режим HPF демонструє різко поліпшену поведінку при перенесенні. Фіг. 1 ілюструє зміну часу утримання частинок у системі FRC при переході зі звичайного режиму в режим HPF. Як можна побачити, згаданий час в режимі HPF збільшився більше ніж в 5 разів. Крім того, фіг. 1 конкретизує час утримання частинок у системі 10 FRC відносно часу утримання частинок в експериментах з відомими FRC. Що стосується цих інших машин, то режим HPF у системі 10 FRC має утримання, коефіцієнт збільшення якого знаходиться між 5 і значенням, близьким до 20. Нарешті - і це найважливіше - природа масштабної інваріантності утримання для системи 10 FRC в режимі HPF різко відрізняється від усіх відомих вимірювань. Перед встановленням режиму HPF в системі 10 FRC виводили різні емпіричні закони масштабування з даних, щоб спрогнозувати часи утримання в експериментах з відомими FRC. Всі ті правила масштабування залежать головним чином від відношення R^2/ρ_i , де R - радіус нуля магнітного поля (несувора міра фізичного масштабу машини), а ρ_i - ларморовський радіус іона, що оцінюється в прикладаному ззовні полі (несувора міра прикладаного магнітного поля). З фіг. 1 зрозуміло, що тривале утримання в звичайній FRC можливе лише при великих габаритах машини і/або сильному магнітному полі. Робота системи 10 FRC у звичайному режимі FRC (режимі CR) відображає тенденцію слідування звичайним правилам, як вказано на фіг. 1. Водночас режим HPF значно перевершує згаданий режим і показує, що набагато краще утримання досягне і без великих габаритів машини або сильних магнітних полів. З фіг. 1 також зрозуміло: важливіше те, що режим HPF порівняно з режимом CR (звичайним режимом) приводить до більшого часу утримання при скорочених розмірах плазми. Аналогічні тенденції помітні також для часів утримання потоку і енергії, як описується нижче, які в системі 10 FRC також збільшилися в 3-8 разів. Отже, великим досягненням режиму HPF є можливість використання невеликої потужності пучків менш сильних магнітних полів і менших габаритів для підтримки і збереження рівноваги FRC в системі 10 FRC і майбутніх більш потужних машинах. Цим удосконаленням сприяють менші витрати на експлуатацію і спорудження, а також зменшена інженерна складність.

Для подальшого порівняння, на Фіг. 18A, 18B, 18C і 18D показані дані з типового розряду в режимі HPF в системі 10 FRC як функцію часу. Фіг. 18(A) зображає радіус потоку, що виключається, на середній площині. Для цих більш тривалих часових масштабів провідна сталева стінка більше не є хорошим консерватором потоку, і магнітні зонди, внутрішні відносно стінки, доповнюються зондами ззовні стінки, щоб належно враховувати дифузію магнітного потоку через сталь. Порівняно з типовими робочими характеристиками в звичайному режимі, як показано на фіг. 13A, 13B, 13C і 13D, режим роботи, що відповідає режиму HPF, демонструє збільшений більш ніж на 400 % час життя.

Типовий графік сліду лінійно інтегрованої густини показаний на фіг. 18B з його інвертованим за Абелем доповненням, профілі густини - на фіг. 18C. Порівняно зі звичайним режимом FRC (режимом CR), як показано на фіг. 13A, 13B, 13C і 13D, плазма є більш статичною протягом всього імпульсу, що свідчить про дуже стійку роботу. В імпульсах HPF також трохи нижче пікова густина - це наслідок більш високої загальної температури плазми (аж до 2 разів), як показано на фіг. 18D.

Для відповідного розряду, проілюстрованого на фіг. 18A, 18B, 18C і 18D, часи утримання енергії, частинок і потоку становлять 0,5 мс, 1 мс і 1 мс, відповідно. У момент початку відліку 1 мс при входженні в розряд, акумульована енергія плазми становить 2 кДж, в той час, як втрати становлять приблизно 4 МВт, що робить цей цільовий набір параметрів вельми придатним для підтримки пучків нейтральних частинок.

На фіг. 19 всі переваги режиму HPF підсумовані у формі знову встановлюваної масштабної інваріантності експериментального утримання потоку в HPF. Якомога побачити на фіг. 19, на основі вимірювань, проведених до і після моменту $t=0,5$ мс, тобто коли $t \leq 0,5$ мс і $t > 0,5$ мс, масштаби утримання потоку (і, аналогічно, утримання частинок і утримання енергії), грубо кажучи, залежать від квадрату температури електронів (T_e) для деякого заданого радіуса сепаратиси (r_c). Це суворе масштабування позитивною потужністю T_e (а не негативною потужністю) повністю протилежне тому, яке демонструється звичайними токамаками, де утримання, як правило, зворотно пропорційно деякій потужності згідно з температурою електронів. Виявлення цієї масштабної інваріантності є прямим наслідком стану HPF і популяції іонів на орбітах великих радіусів (тобто орбітах у масштабі топології FRC і/або щонайменше лінійному масштабі довжини градієнта характеристичного магнітного поля). За великим рахунком, ця нова масштабна інваріантність істотно сприяє високим робочим температурам і дозволяє отримати реактори відносно невеликих розмірів.

За наявності переваг, які дає режим HPF, досяжна підтримка або статичний стан FRC, що збуджується пучками нейтральних частинок, що може бути підтримано за допомогою інжекції належних таблеток, а це означає, що глобальні параметри плазми, такі, як термічна енергія плазми, сумарні кількості частинок, радіус і довжина плазми, а також магнітний потік, підтримуються на обґрунтованих рівнях без істотного спаду. Для порівняння, на фіг. 20 показані дані на графіку А, отримані внаслідок розряду в характерному режимі HPF в системі 10 FRC як функція часу, і на графіку В для проєктованого характерного режиму HPF в системі 10 FRC як функція часу, при цьому FRC 450 підтримується без спаду протягом всьому імпульсу пучка нейтральних частинок. Для отримання графіка А, пучки нейтральних частинок з повною потужністю в діапазоні приблизно 2,5-2,9 МВт інжектували в FRC 450 при тривалості активних імпульсів пучків приблизно 6 мс. Час життя плазми як діаманетика, відображений на графіку А, становив приблизно 5,2 мс. Більш нові дані показують, що при тривалості активних імпульсів пучків приблизно 7 мс досяжний час життя плазми як діаманетика, що становить приблизно 7,2 мс.

Як зазначалося вище в зв'язку з фіг. 16А, 16В, 16С і 16D, кореляція між тривалістю імпульсів пучків і часом життя FRC не є досконалою, оскільки захоплення пучків стає неефективним, коли розміри плазми менше визначених, тобто коли фізичні розміри FRC 450 скорочуються і не всі інжектвані пучки перехоплюються і захоплюються. Скорочення розмірів або спад FRC відбувається насамперед через те, що чисті втрати енергії (~4 МВт приблизно на півшляху через розряд) із плазми FRC під час розряду трохи більше, ніж загальна потужність, що підводиться в FRC за допомогою пучків нейтральних частинок (~2,5 МВт) для конкретного експериментального запуску. Як зазначалося вище в зв'язку з фіг. 3С, похила інжекція з гармат 600, що стріляють пучками нейтральних частинок, до середньої площини поліпшує зв'язок "пучок-плазма" навіть тоді, коли плазма FRC скорочується або іншим чином стискується в осьовому напрямку протягом періоду інжекції. Крім того, належне підживлення таблетками дозволить зберегти необхідну густину плазми.

На графіку В представлений результат етапів моделювання, проведених із використанням тривалості активних імпульсів пучків приблизно 6 мс і загальної потужності пучків із гармат 600, що стріляють пучками нейтральних частинок, що дещо перевищує приблизно 10 МВт, при цьому пучки нейтральних частинок приведуть до інжекції швидких (Н) або дифузійних (D) нейтральних частинок з енергією частинок приблизно 15 кеВ. Еквівалентний струм, інжектований кожним із пучків, становить приблизно 110 А. Для графіка В кут інжекції пучків відносно осі пристрою становив приблизно 20°, а цільовий радіус - 0,19 м. Кут інжекції можна змінювати в межах діапазону 15°-25°. Пучок потрібно спрямовувати в азимутальному напрямку так, щоб струми були паралельними. Рівнодіюча бічних сил, а також рівнодіюча осьових сил, які виникають внаслідок пучків нейтральних частинок з деякою кількістю руху, будуть мінімізуватися. Як і при отриманні графіка А, швидкі (Н) нейтральні частинки інжектуються з інжекторів 600 пучків нейтральних частинок з моменту, коли північна і південна формувальні FRC зливаються в камері 100 утримання в одну FRC 450.

Етапи моделювання, що слугували основою для побудови графіка В, передбачали використання багатомірних алгоритмів рішення за допомогою магнітогідродинамічного (MHD) генератора Хола для отримання плазми і рівноваги відповідно до відомих методів, повністю кінетичних алгоритмів рішення методом Монте-Карло для складових інтенсивних пучків і всіх процесів розсіяння, а також використання системи рівнянь для всіх сімейств плазми з метою моделювання інтерактивних процесів втрат. Транспортні компоненти емпірично калібровані і відмічені реперами відносно експериментальної бази даних.

Як показано за допомогою графіка В, термін служби діаманетиків в усталеному стані FRC 450 буде дорівнювати тривалості імпульсу пучка. Водночас, важливо зазначити, що ключовий кореляційний графік В показує, що коли пучки відключають, плазма або FRC починає спадати в цей момент, але не раніше. Цей спад аналогічний тому, що спостерігається при розрядах, які не стимулюються пучками, - ймовірно, після закінчення близько 1 мс після моменту відключення, - і просто відображає характеристичний час спаду плазми, що збуджується процесами власних втрат.

Звертаючись до фіг. 21В, 21С, 21D і 21Е, зазначаємо, що результати експериментів, проілюстровані на цих кресленнях, показують збереження FRC або сталий стан, що збуджується від похилих пучків нейтральних частинок, тобто, глобальні параметри плазми, такі, як радіус плазми, густина плазми, температура плазми, а також магнітний потік, підтримуються на постійних рівнях без спаду в кореляції з тривалістю імпульсів пучків нейтральних частинок (NB). Наприклад, такі параметри плазми підтримуються, по суті, постійними протягом ~5+ мс. Такі робочі характеристики плазми, включаючи ознаку підтримки, мають сильну кореляцію з тривалістю імпульсів NB, при цьому діаманетизм зберігається навіть протягом декількох мілісекунд після закінчення NB завдяки накопичуванню швидким іонам. Як зображено, робочі характеристики плазми обмежуються лише обмеженнями з тривалості імпульсів, які виникають через кінцеві акумульовані енергії в пов'язаних з цим джерелах живлення багатьох критичних систем, таких, як інжектори NB, а також в інших компонентах систем.

Налаштовувані енергії пучків, які отримуються з пучків нейтральних частинок

Як зазначалося вище в зв'язку з Фіг. 3А, 3В, 3С, 3D, 3Е і 8, в системі 10 FRC розгортають пучки 600 нейтральних атомів, щоб забезпечити нагрівання і збудження струму, а також розвинути тиск швидких частинок. Навколо центральної камери 100 утримання розташовані окремі тракти пучків, що містять системи 600 інжекції пучків нейтральних атомів, і - як показано на фіг. 3С, 3D і 3Е - переважно нахилени для інжекції швидких нейтральних частинок до середньої площини камери 100 утримання.

Щоб додатково поліпшити збереження FRC і продемонструвати розгін FRC до високих температур плазми і підвищених енергій системи, пропонована система FRC 10 включає в себе систему 600 інжекторів пучків нейтральних частинок (NBI, neutral beam injector), яка має підвищену потужність і збільшену тривалість імпульсів, наприклад, можливо - лише з метою підведення потужності близько 20+ МВт з тривалістю імпульсів аж до 30 мс. Система 600 NBI включає в себе множину інжекторів 615 на основі позитивних іонів (див. Фіг. 3D і 3Е), що мають універсальну модульну конструкцію з піднабором інжекторів NBI 615, наприклад - з чотирма (4) з восьми (8) інжекторів NBI 615, що мають здатність налаштовувати енергію пучка під час пострілу від більш низької початкової енергії пучків при пострілі до підвищеної енергії пучків, наприклад - від приблизно 15 кеВ до приблизно 40 кеВ при постійному струмі пучка. Ця здатність інжекторів NBI 615 бажана для того, щоб досягнути більш ефективного розгону і нагнітання тиску активної зони 450 плазми, що витікає звідси. Зокрема, ця здатність дозволяє отримати вельми бажане підвищення робочих характеристик на піковому робочому рівні енергії порівняно з низьким рівнем енергії: наприклад, (i) коефіцієнт більш високої потужності нагрівання доходить до 2-х; (ii) зниження втрат через обмін зарядами близьке до 5-тикратного; і (iii) ріст теплопродуктивності аж до двократного. Крім того, безперервно змінювана енергія пучка, яка виробляється інжекторами NBI 615, забезпечує оптимальне узгодження орбітальних параметрів інжектіваних, а потім захоплюваних швидких іонів відносно миттєвих профілів значень магнітного тиску під час процесу розгону. І, нарешті, високі швидкості зміни, які дозволяють досягнути тривалості розгону, що становить 0,1-10 мс, нарівні зі швидкою (близько 1 мс або менше) налаштуваністю енергії пучка, а потужність інжекторів NBI 615 забезпечує додаткові ефективні "ручки керування", тобто, керовані конструктивні елементи для надання плазмі форми і активного керування плазмою зі зворотним зв'язком за допомогою модуляції енергії пучка і потужності.

Для забезпечення нагрівання і нагнітання тиску FRC 450 необхідна достатня потужність, як для підтримки, так і для розгону до високотемпературних плазм і підвищених енергій системи. У припущенні достатньо низьких швидкостей втрат, швидкість розгону є функцією головним чином того, наскільки більшу потужність можна поглинути в активній зоні 450 FRC за допомогою інжекторів NBI 615 в будь-який заданий момент часу. Отже, завжди бажана підвищена потужність основного пучка нейтральних частинок через порт інжекції.

Більше того: ефективна швидкість нагрівання завдяки інжекторам NBI 615 є результатом складної взаємодії між характеристиками інжектіваного пучка і подальшими стійкими миттєвими профілями температур всіх типів частинок, густин електронів і іонів, концентрації нейтральних частинок, а також магнітного поля, що проходить через активну зону 450 FRC. З них, профілі магнітного поля навмисно змінюють у субмілісекундних часових масштабах за допомогою системи керування під час розгону, тоді як пов'язані з кінетичним тиском профілі еволюціонують завдяки внутрішнім змінам, що є результатом процесів самоорганізації і турбулентності в межах плазми, а також енергії, що поглинається процесом інжекції. Налаштовуваність пучків забезпечує засіб найбільш оптимальної адаптації до цих змінюваних умов.

Наприклад, поперечний переріз обміну зарядами, тобто, імовірність захоплення електрона швидким іоном з утворенням нейтрального атома, дуже залежить від енергії пучків. Для діапазону 15-40 кеВ швидкість обміну основними зарядами різко зменшується як функція енергії пучка. Отже, при будь-якому заданому рівні поля, утримання енергії в плазмі виявляється найвищим, коли інжекція частинок при найбільшій енергії сумісна з таким рівнем поля (серед іншого, це вимагає, щоб енергія інжектіваних частинок приводила до знаходження радіуса орбіти захоплюваного іона в межах внутрішньої стінки системи для утримання).

Ще один приклад впливів профілів на загальну теплопродуктивність стосується ситуації поглинання потужності. Більш висока енергія пучків у типових випадках буде приводити до більшого поглинання енергії на периферії FRC порівняно з активною зоною. Наростання магнітного поля, що супроводжується підтримкою тієї ж енергії пучків в ньому, приведе до більш стиснутих орбіт захоплюваних іонів і пропорційно більшого зв'язку по потужності з плазмою активної зони FRC. Тоді ці факти мають також сильний вплив на утримання енергії; наприклад, енергію, що поглинається на периферії, набагато легше транспортувати з системи вздовж структури незамкнених силових ліній поля, тоді як енергія, що поглинається в активній зоні, втрачається порівняно повільніше завдяки меншим часам перерізу поля. Таким чином, бажана тісна координація розгону магнітного поля і належних збільшень енергії пучків.

Система 600 пучків призначена для швидкої лінійної зміни напруги в діапазоні 0,1-10 мс. Це забезпечує потенціал для збільшення температур іонів і електронів з коефіцієнтами 2 і 10, відповідно,

і здійснення цього у часових масштабах, менших, ніж типові часи наростання макроскопічних нестійкостей. Отже, відбувається фундаментальне збільшення стійкості плазми, як і експлуатаційної надійності і відтворюваності.

Різні часи наростання напруги, що становлять від 0,05 до 1 мс, забезпечують часи достатньо швидкого відгуку, так що пучки можна використовувати як частину системи активного зворотного зв'язку. Таким чином, для керування макро- і мікростійкістю можна використовувати модуляцію пучків. Наприклад, проводячи короткочасний зсув радіального профілю поглинання потужності завдяки зміні енергії пучків (і тим самим - зсуву моделі радіального поглинання енергії), можна вплинути на градієнти тиску, які можуть послужити противагою підмножині нестійких режимів плазми. Система 10 FRC, показана на фіг. 3D і 3E, використовує цю здатність нарівні зі швидким магнітним зворотним зв'язком для керування внутрішніми перевертаннями, швидкостями обертання, розвитком дрейфових хвиль, і інші сценарії експлуатації.

Фіг. 25 ілюструє зображення інжектора 615 NBI пропонованої системи FRC 10. Інжектор 615 NBI показаний в можливому варіанті здійснення таким, що включає в себе: збудник 650 дуги; плазмову камеру 651; іонно-оптичну систему 652, що містить угруповання тріодів або тетродів видільних і прискорювальних решіток; напрямну підвіску 653; нейтралізатор 654, який містить дугові випарники 655, наприклад, такі, як дугові випарники титану, кріонасос 656, що має поверхневі структури, наприклад, такі, як ребристі поверхневі структури, конфігурація яких забезпечує інтенсифіковану циркуляцію кріогенної рідини, і відхильний магніт 656 для видалення не нейтралізованих іонів; і колімірувальну апертуру 658, в яку вміщений калориметр 659, що вставляється, для визначення характеристик, діагностики і повторного калібрування пульсуючих пучків.

Кажучи конкретно і звертаючись до фіг. 26, зазначаємо, що, як показано тут, втілення налаштовуваної системи пучків переважно базується на іонооптичній системі (IOS, ion optical system) 660 тріодного типу. Задум полягає в алгоритмі прискорення-сповільнення. Як зображено на фіг. 26, на першій сітці G1 встановлена напруга V1, тоді як на другій сітці G2 встановлена напруга V2, а на заключній сітці G3 встановлена напруга V3. Іони, що виводяться, спочатку прискорюють до енергії $E1=e \times (V1-V2)$ в процесі пересікання проміжку між G1 і G2 ("e" тут позначає електричний заряд іона). Потім їх сповільнюють у проміжку між G2 і G3 таким чином, що $E2=E1+e \times (V2-V3)$. Напругу в типових випадках регулюють так, що $V1 > V2 > V3$. На основі належних окремих джерел живлення PS1, PS2, PS3 напругою сіток можна регульовано надавати прирости протягом імпульсу, щоб змінити вихід 662 іонів, що випускаються. Наприклад, щоб запустити імпульс пучка атомів водню, можна регулювати робочі напруги, досягаючи $V1=15$ кВ, $V2=-25$ кВ і $V3=0$ В. Тоді іони первинного пучка будуть прискорюватися спочатку до 40 кеВ, а потім виходять з IOS з енергією 15 кеВ. Пізніше в імпульсі можна перемикає джерела живлення, забезпечуючи $V1=40$ кВ, $V2=-1$ кВ, $V3=0$ В. Тоді сповільнення пучків у другому проміжку буде практично відсутнім, даючи вихід енергії пучків приблизно 40 кеВ. Керування кожним з джерел живлення здійснюють окремо, і це забезпечує належну модуляцію напруг. Іони первинного пучка витягуються з різноманіття іонів стандартного дугового або радіочастотного плазмового джерела PS. Після випускання з IOS 660 пучки 662 іонів проходять нейтралізатор 664, де швидкі іони перетворюються у нейтральні іони за допомогою обміну зарядами з електронами холодного нейтрального газу, присутнього в нейтралізаторі 664. Належна циркуляція кріогенної рідини запобігає витіканню нейтрального газу з розташованого нижче за течією отвору нейтралізатора 664. На торці нейтралізатора також є належний поворотний магніт 666, який забезпечує відведення не нейтралізованих швидких іонів 663, і пов'язаний з ним поглинач 668 іонів, призначений для поглинання швидких іонів і їхньої енергії. Пучок 670 атомів, що випускається, потім пропускають через придатну апертуру 672, щоб зменшити розбіжність пучка і забезпечити добре колімірований потік нейтральних атомів до активної зони реактора.

У альтернативному варіанті, IOS виконаний на основі тетродної конструкції. У цьому випадку IOS складається з чотирьох сіток, які мають такий же основний блок прискорення-сповільнення, як той, що пояснювався для випадку тріодної конструкції. Фахівці в цій галузі техніки легко розпізнають аналогію між компонентами системи і принципи роботи. Введення четвертої сітки забезпечує можливості точного налаштування і загальний підвищений експлуатаційний універсалізм.

Можливі варіанти здійснення, представлені тут, були описані в попередній заявці на патент США № 62/414,574, яка включена в цей документ за допомогою посилання.

Керування стабільністю плазми і її осьовим положенням

Звичайні вирішення проблем нестійкостей FRC в типових випадках забезпечують стійкість в осьовому напрямку завдяки нестійкості в радіальному напрямку, або стійкість у радіальному напрямку завдяки осьовій нестійкості, а не стійкість в обох напрямках одночасно. У першому наближенні, рівновага, при якій положення плазми поперечно або радіально стійке, має бажану властивість, будучи вісесиметричною, завдяки осьовій нестійкості. У зв'язку з вищевикладеним, представлені тут варіанти здійснення спрямовані на створення систем і способів, які сприяють стійкості плазми FRC, як в радіальному, так і в осьовому напрямку, а також керування осьовим положенням плазми FRC

вздовж осі симетрії камери утримання плазми FRC незалежно від властивостей осьової стійкості рівноваги плазми FRC. Водночас, передбачається активне керування нестійкістю осьового положення за допомогою набору зовнішніх вісесиметричних котушок, які керують осьовим положенням плазми FRC. Пропоновані системи і способи забезпечують здійснюване зі зворотним зв'язком керування осьовим положенням плазми FRC незалежно від властивостей стійкості рівноваги плазми завдяки впливу на напруги, що прикладаються до набору зовнішніх котушок, концентричних з плазмою, і використання методу нелінійного керування.

Представлені тут варіанти здійснення передбачають використання аксіально нестійких рівноваг FRC, щоб добитися радіальної стійкості, стабілізуючи або усуваючи при цьому осьову нестійкість. Таким чином, можна отримати стійкість, як в осьовому, так і в радіальному напрямку. Для чергування зовнішнього або рівноважного магнітного поля розроблена методологія керування, що дозволяє зробити плазму FRC радіально або поперечно стійкою завдяки наданню осьової нестійкості, а потім впливати на струм котушки радіального поля, щоб невідкладно повернути положення плазми FRC до середньої площини, мінімізуючи при цьому перерегулювання і/або коливання біля середньої площини камери утримання. Перевага цього рішення полягає в тому, що воно знижує складність виконавчих механізмів, необхідних для керування. Порівняно зі звичайними рішеннями з декількома ступенями свободи, методологія представленого тут варіанта здійснення знижує складність, що вноситься в задачу керування вздовж осі обертання плазми FRC, що має один ступінь свободи.

Комбінація форм коливань у струмах котушок, завантаження і потужності пучка нейтральних частинок, яка приводить до аксіально нестійкої плазми, визначає сценарій керування плазмою, який переводить плазму в аксіально нестійку ситуацію. Сценарій може бути попередньо запрограмований з використанням попередніх знань про етапи моделювання або експерименти, або керуватися зі зворотним зв'язком для збереження рівноваги, яка є аксіально нестійкою. Положенням плазми потрібно керувати під час розрядів незалежно від властивостей стійкості рівноваги, наприклад, схема керування повинна працювати або для аксіально стійкої, або для аксіально нестійкої плазми, аж до межі. Найбільш аксіально нестійка плазма, якою можна керувати, має час росту, порівнянний зі скін-часом ємності.

Звернемося тепер до систем і способів, які полегшують стабілізацію плазми FRC як в радіальному, так і в осьовому напрямках, і керування осьовим положенням плазми FRC вздовж осі симетрії камери утримання плазми FRC. На фіг. 27 показана спрощена схема для ілюстрації можливого варіанта здійснення механізму 510 керування осьовим положенням. Обертова плазма 520 FRC, показана в межах камери 100 утримання, має струм 522 плазми і напрямок 524 осьового зміщення. Рівноважне поле (не показано) створюється в межах камери 100 компонентами, які створюють симетричні струми, такими як, наприклад, котушки 412 квазіпостійного струму (див. фіг. 2, 3A, 3D і 3E). Рівноважне поле не створює рівнодіючої сили в напрямку 524 осьового зміщення, але може бути налаштоване на створення або поперечно/радіально, або аксіально стійкої плазми. Для цілей варіанта здійснення, представленого тут, рівноважне поле налаштоване на створення поперечно/радіально стійкої плазми 520 FRC. Як зазначалося вище, це приводить до осьової нестійкості і, таким чином, осьового зміщення плазми 520 FRC в напрямку 524 осьового зміщення. Оскільки плазма 520 FRC переміщається аксіально, вона індукуює струми 514 і 516, які є антисиметричними, тобто в протилежних напрямках в стінках камери 100 утримання на кожній стороні середньої площини камери 100 утримання. Плазма 520 FRC буде індукувати ці типи складових струму як в ємності, так і у зовнішніх котушках. Ці антисиметричні складові 514 і 516 струмів створюють радіальне поле, яке взаємодіє з тороїдальним струмом 522 плазми, створюючи силу, яка протидіє переміщенню плазми 520 FRC, і результатом цієї сили є те, що вона сповільнює осьові зміщення плазми. У зв'язку з опором камери 100 утримання, відбувається поступове витікання цих струмів 514 і 516 з часом.

Котушки 530 і 531 радіальних поля, розташовані навколо камери 100 утримання на кожній стороні середньої площини, забезпечують додаткові складові радіального поля, які зумовлені струмами 532 і 534, індукованими в протилежних напрямках в котушках 530 і 531. Котушки 530 і 531 радіального поля можуть містити набір вісесиметричних котушок, які можуть бути розміщені всередині або ззовні ємності 100 для утримання. Котушки 530 і 531 радіальних поля, як показано, розташовані зовні ємності 100 для утримання, аналогічно котушкам 412 (див. фіг. 2, 3A, 3D і 3E) квазіпостійного струму. Кожна з котушок 530 і 531 або наборів котушок може нести інший струм, ніж котушки на протилежній стороні середньої площини, але струми є антисиметричними відносно середньої площини ємності 100 для утримання і створюють структуру магнітного поля з $B_z \neq 0$, $B_r = 0$ вздовж середньої площини. Котушки 530 і 531 радіального поля створюють додаткову складову радіального поля, яка взаємодіє з тороїдальним струмом 522 плазми, створюючи осьову силу. Осьова сила, своєю чергою, переміщує плазму назад до середньої площини камери 100 утримання.

Механізм 510 керування включає в себе систему керування, виконану з можливістю впливу на струм котушок радіального поля, щоб оперативно повертати положення плазми до середньої площини, мінімізуючи при цьому перерегулювання і/або коливання біля середньої площини машини.

Система керування включає в себе процесор, функціонально зв'язаний з котушками 530 і 531 радіального поля, котушками 412 квазіпостійного струму, їхніми відповідними джерелами живлення й іншими компонентами, такими, як, наприклад, магнітні датчики, що надають вимірювання положення плазми, швидкості плазми і струму активних котушок. Конфігурація процесора може забезпечувати виконання обчислень і аналізів, описаних в цій заявці, і може включати в себе або бути комунікативно зв'язаним з одним або більше запам'ятовуваними пристроями, включаючи машиночитаний носій для довготривалого зберігання. Він може включати в себе систему на основі процесора або мікропроцесора, включаючи системи, що використовують мікроконтролери, комп'ютери зі скороченим набором команд (RISC, reduced instruction set computer), інтегральні схеми прикладної орієнтації (ASIC, application specific integrated circuit), логічні схеми і будь-яку іншу схему або процесор, здатний виконувати функції, описані тут. Вищенаведені приклади є лише ілюстративними і, отже, не призначені для обмеження яким-небудь чином визначення і/або значення терміна "процесор" або "комп'ютер".

Функції процесора можуть бути реалізовані з використанням програмних процедур, апаратних компонентів або їхніх комбінацій. Апаратні компоненти можуть бути реалізовані з використанням різних технологій, включаючи, наприклад, інтегральні схеми або окремі електронні компоненти. Процесорний блок, як правило, включає в себе зчитуваний/записуваний пристрій зберігання даних і, як правило, також включає в себе апаратне і/або програмне забезпечення для запису і/або зчитування пристрою зберігання даних.

Процесор може включати в себе обчислювальний пристрій, пристрій введення, блок відображення і інтерфейс, наприклад, для доступу до мережі Internet. Комп'ютер або процесор може включати в себе мікропроцесор. Мікропроцесор може бути підключений до шини зв'язку. Комп'ютер або процесор також може включати в себе запам'ятовувачий пристрій. Запам'ятовувачий пристрій може включати в себе оперативний запам'ятовувачий пристрій (RAM) і постійний запам'ятовувачий пристрій (ROM). Комп'ютер або процесор також може включати в себе пристрій зберігання даних, який може бути жорстким диском або знімним накопичувачем, таким, як дисковод гнучких дисків, оптичний дисковод і т. п. Пристрій зберігання також може бути іншим аналогічним засобом для завантаження комп'ютерних програм або інших команд у комп'ютер або процесор.

Процесор виконує набір команд, які зберігаються в одному або більше елементах зберігання, для обробки вхідних даних. Елементи зберігання також можуть зберігати дані або іншу інформацію за бажанням або за потреби. Елемент зберігання може бути виконаний у вигляді джерела інформації або фізичного елемента пам'яті в межах обчислювальної машини.

Задача керування положенням аксіально стійкої або нестійкої конфігурації FRC з використанням приводів котушок радіального поля вирішена з використанням гілки теорії нелінійного керування, відомої як керування з ковзним режимом. Лінійна функція станів системи (поверхня ковзання) виступає в ролі сигналу помилки з необхідною асимптотично стійкою (ковзною) поведінкою. Поверхня ковзання розроблена з використанням теорії Ляпунова для виявлення асимптотичної стійкості в широкому діапазоні динамічних параметрів FRC. Пропонована схема керування потім може бути використана як для аксіально стійкої, так і нестійкої плазми без необхідності переналаштування параметрів, що використовуються на поверхні ковзання. Ця властивість є переважною, оскільки, як згадувалося раніше, рівновазі, можливо, доведеться здійснювати перехід між аксіально стійкою і нестійкою рівновагою на різних фазах розряду FRC.

Конфігурація схеми 500 керування показана на фіг. 28. Фільтр нижніх частот (LPF) обмежує частоти перемикання в межах необхідної ширини смуги керування. Передбачається наявність цифрового контура керування, що вимагає дискретизації і передачі сигналу із затримкою на одну вибірку. Сигнал помилки (поверхня ковзання) являє собою лінійну комбінацію струму котушок, положення плазми і швидкості плазми. Положення і швидкість плазми беруться із зовнішніх магнітних вимірювань. Струми в системах активних котушок можуть бути виміряні стандартними способами.

Струми котушок і положення плазми необхідні для здійснення керування положенням. Швидкість плазми потрібна для поліпшення ефективності, але вона не є обов'язковою. Нелінійна функція цього сигналу помилки (закон керування реле) генерує дискретні рівні напруги для кожної пари джерел живлення, підключених до симетричних котушок середньої площини. Симетричні котушки середньої площини живляться напругою реле однакової інтенсивності, але протилежного знаку. Це створює складову радіального поля для повернення положення плазми до середньої площини.

Щоби продемонструвати здійсненність схеми керування, для моделювання динаміки плазми використовується модель жорсткої плазми. Модель використовує геометрію магніта. Розподіл струму плазми відповідає аксіально нестійкій рівновазі з часом росту 2 мс, коли розглядаються тільки плазма і ємність. Передбачається, що джерела живлення працюють із дискретними рівнями напруги, звичайно - з кроками по 800 В.

На фіг. 29 показані декілька етапів моделювання керування плазмою, які виділяють відношення між напругами, що прикладаються до котушок, і часами встановлення положення плазми, а також необхідним піковим струмом котушок і швидкостями лінійної зміни, щоб повернути до середньої

площини плазму, яка була зміщена в осьовому напрямку на 20 см. Ці приклади моделювання керування осьовим положенням з ковзним режимом виконуються при 0,3 Тл з використанням чотирьох пар зовнішніх обрізних котушок. Показані чотири випадки, які відповідають джерелам живлення з дискретними рівнями напруги з кроками по 200 В (суцільний квадрат), 400 В (суцільне коло), 800 В (суцільний трикутник) і 1600 В (порожнистий квадрат). Для всіх чотирьох випадків ширина смуги керування становить 16 кГц, а частота дискретизації - 32 кГц. Показані положення плазми (верхній графік), струм у крайній зовнішній парі котушок (середній) і швидкість лінійної зміни струму котушок (нижній). Зміщенню плазми дозволено рости нестійко, поки вона не досягне 20 см. На цьому етапі застосовується керування зі зворотним зв'язком.

Результати моделювання показують, що:

1. щоб повернути плазму до середньої площини протягом 5 мс (сліди суцільних квадратів), достатньо швидкості розгону котушки в 0,5 МА/с з вимогою джерела живлення в 200 В;
2. щоби повернути плазму до середньої площини протягом 2,3 мс (сліди суцільних кіл), достатньо швидкості розгону котушки в 1 МА/с з вимогою джерела живлення в 400 В;
3. щоб повернути плазму до середньої площини протягом 1,3 мс (сліди суцільних трикутників), достатньо швидкості розгону котушки в 2 МА/с з вимогою джерела живлення в 800 В;
4. Щоб повернути плазму до середньої площини протягом 1,0 мс (сліди порожнистих квадратів), достатньо швидкості розгону котушки в 4 МА/с з вимогою джерела живлення в 1600 В.

Пікові струми для всіх обрізних котушок для третього випадку, розглянутого вище (випадок швидкості розгону в 2 МА/с), також показані на фіг. 30 залежно від положення обрізної котушки. Приклади моделювання керування осьовим положенням із ковзним режимом виконуються при 0,3 Тл з використанням чотирьох пар зовнішніх обрізних котушок з використанням джерела живлення з трьома рівнями (+800 В, 0, -800 В), ширини смуги керування 16 кГц і частоти дискретизації 32 кГц. Щоби повернути плазму до середньої площини протягом 1,3 мс, потрібна швидкість розгону котушки 2 МА/с. Піковий струм, необхідний у всій парі котушок, становить менше ніж 1,5 кА. Фактична необхідна частота перемикання (приблизно 2 кГц) значно нижче ширини смуги системи керування.

Система керування також може бути реалізована на цільовій поверхні, яка є функцією тільки струму котушок і швидкості плазми, без положення плазми. У цьому випадку контур керування осьовим положенням забезпечує тільки стабілізацію осьової динаміки, але не керування. Це означає, що плазма знаходиться в метастійкій ситуації і може повільно дрейфувати вздовж своєї осі. Тоді керування положенням забезпечується з використанням додаткового контура зворотного зв'язку, який керує проміжками плазми між сепаратрисою плазми і ємністю, а отже - виконує одночасно керування формою і положенням плазми.

Ще одним пристроєм утримання плазми, в якому використовуються аналогічні системи керування, є токамак. Для збереження утримання плазми струм плазми в токамаку повинен підтримуватися між нижньою і верхньою межами, які приблизно пропорційні густині плазми і тороїдальному полю, відповідно. Для роботи при високій густині плазми струм плазми повинен бути збільшений. У той же час, полоїдальне поле повинно підтримуватися якомога більш слабким, щоб коефіцієнт q безпеки був вищим ніж $q=2$. Це досягається завдяки подовженню плазми вздовж напрямку осі машини, що дозволяє налагоджувати великий струм плазми (а отже - і забезпечувати високу густину плазми) без збільшення граничного магнітного поля за його межі безпеки. Ці подовжені плазми нестійкі вздовж напрямку осі машини (відомого на жаргоні токамаків як вертикальний напрям), а також вимагають механізмів стабілізації плазми. Керування вертикальним положенням плазми в токамаках також відновлюється з використанням набору котушок радіального поля, тому воно дуже нагадує проблему керування положенням FRC. Однак причини, які вимагають стійкості в токамаку і FRC, різні. У плазмі токамака вертикальна нестійкість - це штраф, який потрібно заплатити, щоб працювати при великому струмі плазми, для чого потрібне подовження плазми для роботи з сильним тороїдальним полем. У випадку FRC, нестійкість плазми - це штраф, який потрібно заплатити, щоб отримати поперечну стійкість. Токамаки мають тороїдальне поле, яке робить конфігурацію стійкою, тому їм не потрібна поперечна стійкість.

Цей винахід спрямований на полегшення генерування і збереження цільової плазми FRC з високим потоком і осьовим поповненням. У можливому варіанті здійснення процес включає в себе формування FRC з великим потоком (до 30 мВб) шляхом об'єднання двох сферомаків із протилежно спрямованими спіральностями. Експерименти з об'єднання одне з одним двох плазмових тороїдів типу сферомаків завдяки контакту і перемикавню вздовж тороїдально симетричної лінії. Сферомак - це плазма сферичної або тороїдальної форми, в якій не схильні до дії сил струми ($j \times B = 0$) встановлюють рівноважну конфігурацію залежно від того, чи існує розрив струму (поток) на головній осі. Два тороїдальні сферомаци, які несуть однаковий тороїдальний струм з тим же самим або протилежним тороїдальним полем, примусово об'єднують, керуючи струмами зовнішніх котушок; ці випадки називаються об'єднанням з однаково спрямованими спіральностями або об'єднанням з протилежно

спрямованими спіральностями, відповідно. Як описано в першоджерелі Yamada, M., et al., Phys. Rev. Lett. 65, 721 (1990), об'єднання з протилежно спрямованими спіральностями приводить до генерування перемикання силових ліній магнітного поля в місцях перемикання, де очікувалося вельми ефективне здійснення перемикання (Bhattacharjee, A., Phys. Fluids 26, 3332 (1983)). Експериментальні результати також вказали, що в глобальному значенні об'єднання з протилежно спрямованими спіральностями дійсно привело до значно більш швидкого перемикання, ніж у разі об'єднання з однаково спрямованими спіральностями, і подальшого форсування структури FRC з високим магнітним потоком (що складається лише з полоїдального поля) після виключення протилежно спрямованих тороїдальних полів сферомаків завдяки об'єднанню.

У можливому варіанті здійснення процес включає в себе:

1. генерування цільової плазми FRC з великим магнітним потоком ($\Phi_p \sim 25-30$ мВб) за допомогою об'єднання сферомаків із протилежно спрямованими спіральностями з використанням MCPG;

2. посилення, стабілізацію і заживлювання плазми FRC, приходячи до умов, характерних для плазми реактора термоядерного синтезу, шляхом формування цільової плазми з достатнім магнітним потоком і інжекції пучків високоенергетичних нейтральних частинок, тим самим здійснюючи подальше перетворення енергії тих пучків у теплову енергію;

3. формування і інжекцію додаткових багатоімпульсних сферомаків у плазму FRC для поповнення частинок і стікання з метою підтримки і поліпшення властивостей утримання плазми FRC, а також досягнення режиму густої FRC з високим потоком.

Звертаючись до фіг. 31A і 31B, зазначаємо, що тут ілюструється можливий варіант здійснення системи утримання FRC як такої, що має камеру 100 утримання і пару диверторів 302, зв'язаних з камерою 100 утримання на кожному торці. Щоб генерувати оптимальну вихідну цільову плазму 453 FRC з високим потоком, з протилежними торцями розташованої по центру камери 100 утримання зв'язана пара інжекторів 250 сферомаків середнього масштабу (або намагнічених коаксіальним плазмових гармат (MCPG)). Інжектори 250 сферомаків інjektують плазми сферомаків з високим магнітним потоком (>20 мВб) у напрямку до середньої площини камери 100 утримання, де сферомакі об'єднуються і утворюють плазму FRC в камері 100 утримання. Об'єднання з протилежно спрямованими спіральностями двох сферомаків звичайно спричиняє генерування цільової плазми FRC з великим магнітним потоком ($\Phi_p \sim 25-30$ мВб), що має збільшений захоплений магнітний потік. З камерою 100 утримання також зв'язана множина інжекторів 615 пучків нейтральних частинок під деяким кутом у напрямку до середньої площини камери 100 утримання з метою збудження і збереження плазми 453 FRC. У можливих варіантах здійснення інжектори 615 пучків нейтральних частинок виконані з можливістю регулювання від вихідного рівня потужності до підвищеного рівня потужності. У додаткових можливих варіантах здійснення інжектори 250 сферомаків виконані з можливістю багатоімпульсної інжекції сферомаків у плазму FRC вздовж геометричної осі камери утримання для поповнення і стікання.

Попередні дослідження об'єднання сферомаків (див. фіг. 32A-32D) продемонстрували життєздатність і потенціал термоядерної плазми компактних тороїдів. У кампанії експериментів з дослідження магнітного перемикання, проведеної в 2004-2008 рр. в лабораторії плазми Принстонського університету (США), методику об'єднання протилежно спрямованих спіральностей застосовували для досліджень формування стійкості і підтримки сплющених FRC. Продемонстровано, що центральний соленоїд омичного нагрівання, що використовувався в токамаках, можна використовувати для посилення тороїдальних струмів у FRC з метою підтримки їх протягом часів, що перевищують час резистивного розпаду (Gerhardt, S.P., et al., Phys. Плазми 15, 032503 (2008)). Крім того, для керування формою меж і подовженням FRC використовували котушки формувальних полів. Це дозволило провести дослідження впливу тих формувальних полів на стійкість. Експериментально продемонстровано, що в сплющеній FRC можна стабілізувати режим нахилу $n=1$ (n : номер тороїдальної моди) (Gerhardt, S.P., et al., Phys. Rev. Lett. 99, 245003 (2007)). Швидкість росту у випадку $n \geq 2$ мод також сповільнювалася сприятливим формоутворенням. Ці результати дали значні переваги в розумінні фізики FRC з незамкнутими межами. На доповнення до цих результатів зі стійкості і витримання, при експериментах з об'єднання протилежно спрямованих спіральностей спостерігалася значне іонне нагрівання. Об'єднання двох сферомаків з однаково спрямованими спіральностями приводило до генерування меншого нагрівання, але - з достатньо високим бета плазми сферомаків ($\beta \sim 0,2-0,3$). Здатність отримувати об'єднані плазми з не знехтувано малою іонною температурою ($T_i > 25$ еВ, $T_e \cong 10$ еВ, $n_e > 10^{14}$ см⁻³) дозволяє дослідити характеристики стійкості плазм з високим бета складової змінного тороїдального поля.

У можливому варіанті здійснення, як ілюструється на фіг. 33, інжектор 250 сферомаків являє собою інжектор відносно компактних сферомаків, що має зовнішній електрод 254, внутрішній електрод 255, покритий вольфрамом, вихідну котушку 252 зміщення, розташовану навколо зовнішнього електрода 254, котушку 253 зміщення, що має залізне осердя, розташовану в межах внутрішнього електрода 255, газодувку 256 і високовольтне джерело 258 живлення. Інжектор 250 сферомаків

створює достатній магнітний потік завдяки використанню і оновленню нещодавно розробленої системи 253 котушок зміщення із залізним осердям (див. Edo, T., et al., Jnl of Plasma and Fusion Res. 13, 3405062 (2018)). У нещодавно проведених попередніх тестах застосовували котушку зміщення, що має повітряне осердя, з джерелом живлення постійного струму, що забезпечує магнітний потік сформованого сферомаку з масштабним коефіцієнтом ($\sim 1,67$ мкВб/А, тоді як MCPG з системою котушок зміщення, що мають залізне осердя (чавун; магнітна проникність $\mu \sim 250$), може дати, грубо кажучи, 100-кратно більший магнітний потік на ампер (тобто, $\sim 0,16$ мВб/А). Підтримуючи густину струму постійною, можна адекватно масштабувати розмір інжектора сферомаків, отримуючи набагато більш високий магнітний потік (>30 мВб) і не викликаючи при цьому небажані ефекти, які, як правило, асоціюються з електродними розрядами. У додатковому можливому варіанті здійснення залізне осердя формують, використовуючи чисте залізо (99,9% Fe; $\mu > 200000$), яке демонструє тенденцію до досягнення більш високого магнітного потоку з прийнятним струмом зміщення.

На фіг. 3D і 3E ілюструється система 10 утримання плазми FRC з об'єднанням СТ, яка містить камеру 100 утримання, першу пару внутрішніх диверторів 302, які зв'язані з протилежними торцями камери 100 утримання і знаходяться навпроти формувальних і інжектуювальних СТ систем 200, зв'язаних на першому торці з внутрішніми диверторами 302, і другу пару зовнішніх диверторів 300, зв'язаних з другим торцем формувальних та інжектуювальних СТ систем 200. Щоб досягнути об'єднання сферомаків, як показано на фіг. 31A, формувальні і інжектуювальні СТ секції 200 і зовнішні дивертори 300, показані на фіг. 3D і 3E, видалені і замінені інжекторами 250 сферомаків, зв'язаними з внутрішніми диверторами, як зображено на фіг. 31A і 31B. Інжектори 250 сферомаків розміщені безпосередньо всередині концентричних електродів 310 диверторів, які використовують для керування стійкістю FRC 453 за допомогою граничного зміщення. Система граничного зміщення створює радіальне електричне поле на незамкнених силових лініях поля, тим самим генеруючи азимутальну течію за допомогою $E_r \times B_z$ навколо сепаратиси FRC (ділянка зішкрябаного шару), що стабілізує глобальні MHD режими синергічно за допомогою інжекції пучків нейтральних пучків (NBI). Інжектори 250 сферомаків експлуатуються і керуються окремо, щоб отримати різні плазми сферомаків, а також вихідну FRC, що дозволяє змінювати густину вихідної плазми і захоплюваний магнітний потік з метою знайти оптимальну цільову FRC для ефективної інжекції пучків нейтральних частинок. Протягом процесу формування, перенесення і об'єднання сферомаків, у секції утримання прикладають відносно слабкі рівноважні і дзеркальні поля ($B_e \sim 1$ кГс, дзеркальні відношення (2) з допомогою врівноважувальних і дзеркальних котушок 412 і 420, внаслідок чого можна адекватно сформувати плазму 453 FRC, після чого ці поля потрібно поступово збільшити (B_e аж до 3 кГс, дзеркальне відношення $\sim 3-3,5$) для утримання і підтримки плазми 453 FRC. Пучки нейтральних частинок також інжектують у камеру 100 утримання з інжекторів 615 протягом всього розряду, а енергію пучків також можна збільшувати від деякого вихідного до деякого підвищеного рівня потужності, наприклад, від ~ 15 кеВ до 40 кеВ, нарівні з розгоном B_e , відповідно. Крім цього, можна активно керувати системою магнітів і інжекторів пучків нейтральних частинок, так що стабілізація і збереження плазми FRC буде відбуватися в реальному масштабі часу.

Для задовільного поповнення частинок, а також стікання вже сформованої FRC всередину камери 100 утримання, інжектори 250 сферомаків заживлюють індивідуально керованими джерелами 258 живлення. Коли біля середньої площини камери утримання встановлюють протилежно орієнтовані інжектори СТ з багатоімпульсними функціональними можливостями, інжектори СТ радіально інжектують сферомакподібний плазмод в FRC; іншими словами, інжектованому СТ доводиться проникати в поперечне магнітне поле ($B_z \sim 1$ кГс), не розбиваючись на складові або не вносячи сильне магнітне збурення або збурення густини. Крім цього, радіальна інжекція СТ біля середньої площини негативно впливає - до деякої міри - на утримання швидких іонів, і система, як правило, виявляється не масштабованою з отриманням термоядерного пристрою. Отже, інжекція СТ з інжекторів 250 сферомаків на геометричній осі (тобто, "осьова" інжекція КТ) значно вигідніше, ніж радіальна інжекція СТ, з декількох наукових точок зору.

Замість цього, в можливих варіантах здійснення конфігурацію системи, проілюстровану на фіг. 2, 3A, 3D і 3E, яка включає в себе дві діаметрально протилежні секції 200 формування тета-пінчів із оберненим полем, можна модифікувати так, що вона буде включати в себе діаметрально протилежні інжектори 250 сферомаків, зв'язані із зовнішніми диверторами 300, для поповнення плазми FRC, що міститься в межах камери утримання.

Відповідно до варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб генерування і збереження магнітного поля із оберненою магнітною конфігурацією (FRC), що передбачає об'єднання плазм перших і других сферомаків і формування FRC навколо об'єднаної плазми в камері утримання, а також збереження FRC на рівні постійного значення або біля нього без спаду за допомогою інжекції пучків швидких нейтральних атомів з інжекторів пучків нейтральних частинок в плазму FRC під деяким кутом до середньої площини камери утримання.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який

додатково передбачає інжекцію плазм сферомаків з протилежних першого і другого інжекторів сферомаків у напрямку до середньої площини камери і об'єднання плазм сферомаків для формування FRC.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає об'єднання плазм сферомаків, що надходять зі сферомаків із протилежно спрямованими спіральностями і інжекттованих в камеру утримання з першого і другого інжекторів сферомаків.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків містять намагнічену коаксіальну плазмову гармату.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків містять систему котушок зміщення із залізними осерддями.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, система котушок зміщення із залізними осерддями містить чавун з магнітною проникністю приблизно 250.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, залізне осердя системи котушок зміщення із залізними осерддями містить приблизно 99,9 % Fe з магнітною проникністю, що дорівнює приблизно 200000 або більшою.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає роздільне керування першим і другим інжекторами сферомаків.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, плазма сферомаків, ежекттована з першого інжектора сферомаків, відрізняється від плазми сферомаків, ежекттованої з другого сферомаків.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає поповнення плазми FRC однією або декількома плазмами сферомаків з одного або більше з першого і другого інжекторів сферомаків уздовж геометричної осі камери утримання.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає багатоімпульсну інжекцію однієї або декількох плазм сферомаків у плазму FRC з одного або більше з першого і другого інжекторів сферомаків.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає формування і інжекцію багатоімпульсних сферомаків у плазму FRC.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає налаштування енергій пучків множини пучків нейтральних частинок між першою енергією пучків і другою енергією пучків, де друга енергія пучків відрізняється від першої енергії пучків, або налаштування енергій пучків множини пучків нейтральних частинок між першою енергією пучків і другою енергією пучків, де друга енергія пучків відрізняється від першої енергії пучків і при цьому друга енергія пучків вище, ніж перша енергія пучків, або налаштування енергій пучків множини пучків нейтральних частинок між першою енергією пучків і другою енергією пучків, де друга енергія пучків відрізняється від першої енергії пучків, і при цьому множину пучків нейтральних частинок перемикають між першою і другою енергіями пучків протягом тривалості інжекційного імпульсу.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає генерування магнітного поля в межах камери з котушками квазіпостійного струму, що простягаються навколо камери з котушками квазіпостійного струму, що простягаються навколо камери.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає спрямування поверхонь магнітного потоку FRC в дивертори, зв'язані з торцями камери утримання.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає генерування магнітного поля у межах диверторів за допомогою котушок квазіпостійного струму, що простягаються навколо формувальних секцій і диверторів.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає генерування дзеркального магнітного поля в межах протилежних торців камери за допомогою дзеркальних котушок квазіпостійного струму, що простягаються навколо протилежних торців камери.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає генерування одного з магнітного дипольного поля і магнітного квадрупольного поля в межах камери за допомогою відхильних котушок, зв'язаних з камерою.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає кондиціювання внутрішніх поверхонь камери і диверторів за допомогою системи гетерування.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, система гетерування включає в себе одну з системи осадження титану і системи осадження літію.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, спосіб додатково передбачає

керування радіальним профілем електричного поля в граничному шарі плазми FRC.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, керування радіальним профілем електричного поля в граничному шарі FRC включає в себе прикладання розподілу електричного потенціалу до групи незамкнених поверхонь потоку FRC за допомогою зміщувальних електродів.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонований спосіб, який додатково передбачає одну з інжекції плазми сферомаків з першого і другого інжекторів сферомаків, що мають магнітний потік більш ніж 20 мВб, або інжекції плазм сферомаків з першого і другого інжекторів сферомаків, що мають магнітний потік більш ніж приблизно 25-30 мВб.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонована система для генерування і збереження магнітного поля із оберненою магнітною конфігурацією (FRC), яка містить: камеру утримання; перший і другий дивертори, зв'язані з камерою утримання; перший і другий діаметрально протилежні інжектори сферомаків, зв'язані з першим і другим диверторами, для генерування плазми сферомаків і перенесення плазми сферомаків у напрямку до середньої площини камери утримання; множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з камерою утримання і орієнтованих на інжекцію пучків нейтральних атомів у напрямку до середньої площини камери утримання під меншим кутом, ніж прямий, до подовжньої осі симетрії камери утримання; магнітну систему, яка містить множину котушок квазіпостійного струму, розташованих навколо камери утримання і першого і другого диверторів; перший і другий набори дзеркальних котушок квазіпостійного струму, розташованих між камерою утримання і першою і другою формувальними секціями; першу і другу дзеркальні пробки, розташовані між камерою утримання і першим і другим диверторами; систему гетерування, зв'язану з камерою утримання і першим і другим диверторами; один або декілька зміщувальних електродів для електричного зміщення незамкненої поверхні потоку генерованої FRC, причому один або декілька зміщувальних електродів розташовані в межах одного або більше з камери утримання і першого і другого диверторів; і дві або більше відхильних котушок, зв'язаних з камерою утримання.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонована система для генерування і збереження магнітного поля із оберненою магнітною конфігурацією (FRC), яка містить: камеру утримання; перший і другий дивертори, зв'язані з камерою утримання; перший і другий діаметрально протилежні інжектори сферомаків, зв'язані з першим і другим диверторами; один або декілька з множини зміщувальних електродів і першу і другу дзеркальні пробки, причому один або декілька зміщувальних електродів розташовані в межах одного або більше з камери утримання і першого і другого диверторів, і при цьому перша і друга дзеркальні пробки розташовані між камерою утримання і першим і другим диверторами; систему гетерування, зв'язану з камерою утримання і першим і другим диверторами; множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з камерою утримання і орієнтованих під кутом у напрямку до середньої площини камери утримання; і магнітну систему, що містить множину котушок квазіпостійного струму, розташованих навколо камери утримання і першого і другого диверторів, і при цьому перший і другий набори дзеркальних котушок квазіпостійного струму розташовані в проміжку камери утримання; причому система виконана з можливістю генерування FRC і збереження FRC без спаду при інжекції пучків нейтральних частинок в плазму.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків виконані з можливістю інжекції плазм сферомаків у напрямку до середньої площини камери для об'єднання і формування плазми FRC.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків виконані з можливістю формування і інжекції в камеру утримання плазм перших і других сферомаків, що мають протилежно спрямовані спіральності.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків містять намагнічену коаксіальну плазмову гармату (MCPG).

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків включають в себе систему котушок зміщення із залізними осердями.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, залізне осердя системи котушок зміщення із залізними осердями містить чавун з магнітною проникністю приблизно 250.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, залізне осердя системи котушок зміщення із залізними осердями містить приблизно 99,9 % Fe з магнітною проникністю, що дорівнює приблизно 200000 або більшею.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків виконані з можливістю роздільного керування.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, перший і другий інжектори сферомаків виконані з можливістю багатоімпульсної інжекції плазм більше одного сферомаків в камеру утримання.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, множина пучків нейтральних частинок виконана з можливістю регулювання між першою енергією пучків і другою енергією пучків,

причому друга енергія пучків відрізняється від першої енергії пучків і при цьому можливе перемикання енергії множини пучків, які належать до множини пучків нейтральних частинок, між першою і другою енергіями пучків протягом тривалості інжекційного імпульсу.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, зміщувальні електроди включають в себе один або декілька з одного або декількох точкових електродів, розташованих у межах камери утримання, для контакту з незамкнутими силовими лініями поля, набір кільцевих електродів між камерою утримання і першим і другим диверторами, і множину електродів, концентрично вкладених у стопу, розташованих у першому і другому диверторах, для заряджання декількох концентричних шарів потоку.

Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонована система, яка додатково містить перші і другі діаметрально протилежні формувальні секції тета-пінчів із оберненим полем, встановлені між першим і другим диверторами і камерою утримання.

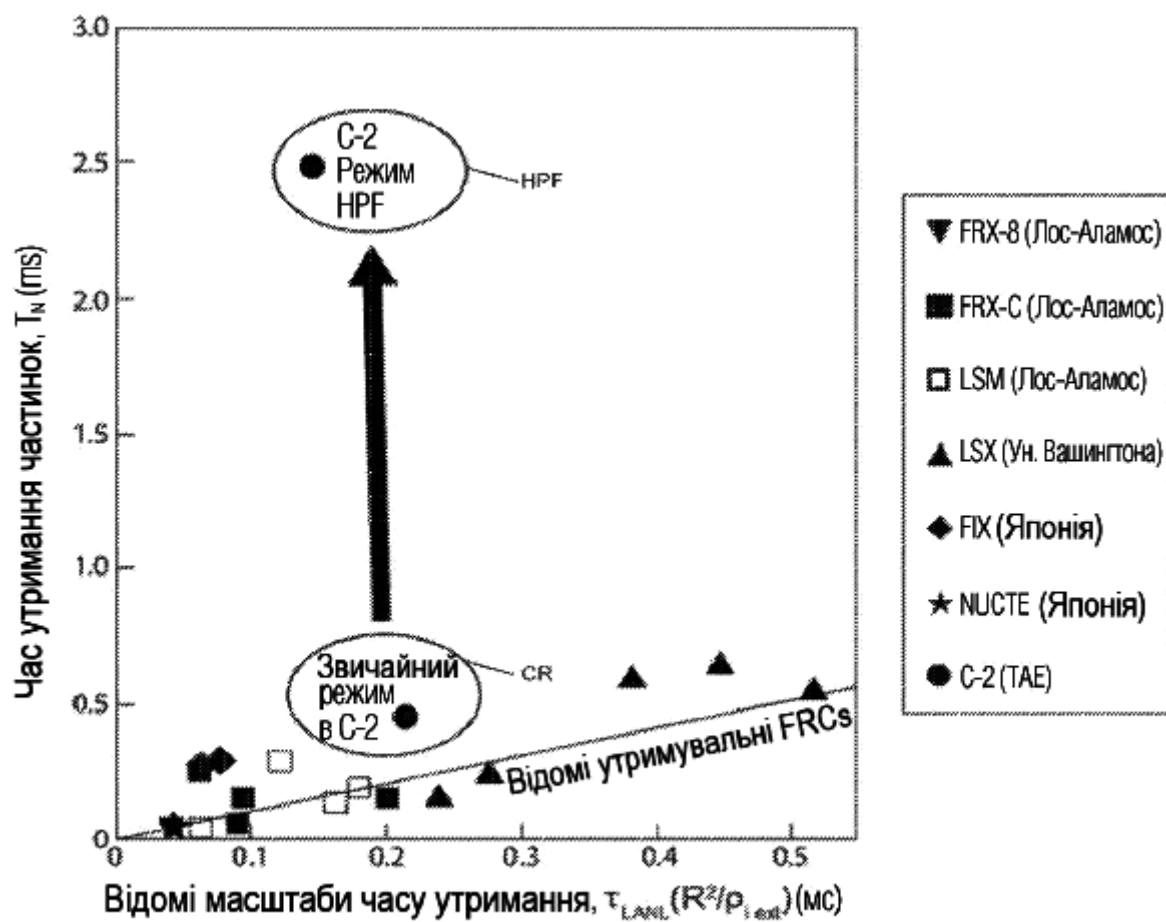
Відповідно до додаткового варіанта здійснення цього винаходу, запропонована система, яка додатково містить третій і четвертий дивертори, встановлені між першим і другим діаметрально протилежними формувальними секціями тета-пінчів із оберненим полем і камерою утримання.

Однак можливі варіанти здійснення, представлені тут, призначені лише як ілюстративні приклади і жодним чином не обмежувальні.

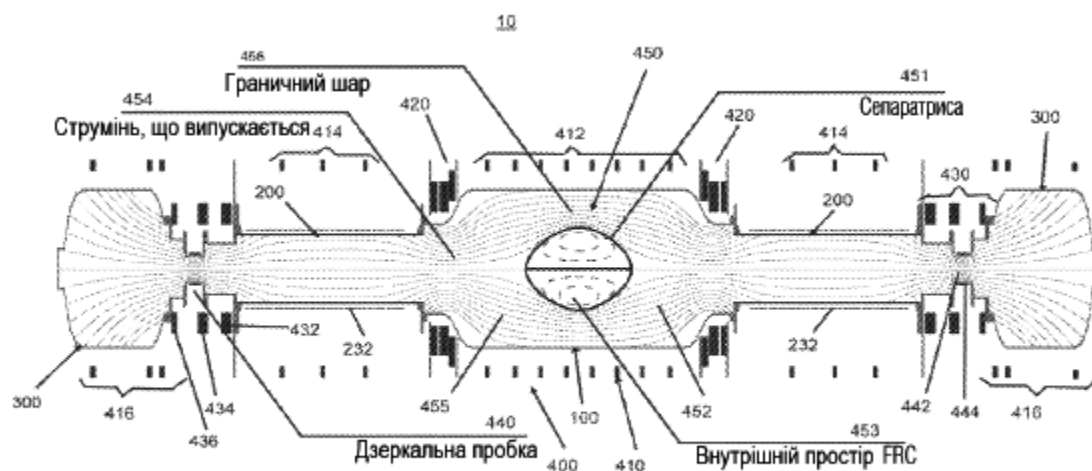
Всі ознаки, елементи, компоненти, функції і етапи, описані відносно будь-якого варіанта здійснення, представленого тут, призначені бути вільно комбінованими і замінюваними відповідними з будь-якого іншого варіанта здійснення. Якщо деяка ознака, елемент, компонент, функція або етап описані відносно тільки одного варіанта здійснення, то потрібно розуміти, що та ознака, елемент, компонент, функція або етап можуть використовуватися з будь-яким іншим варіантом здійснення, описаним тут, якщо явно не вказано інше. Цей абзац, таким чином, в будь-який час служить антецедентною основою і письмовою підтримкою для введення формули винаходу, яка комбінує ознаки, елементи, компоненти, функції і етапи з різних варіантів здійснення або замінює ознаки, елементи, компоненти, функції і етапи з одного варіанта здійснення відповідними з іншого, навіть якщо наступний опис явно не вказує, в конкретному випадку, що такі комбінації або заміни можливі. Явний перелік кожної можливої комбінації і заміни є надмірно обтяжливим, особливо враховуючи, що допустимість всякої і кожної такої комбінації і заміни буде легко зрозуміла фахівцями в цій галузі техніки по прочитанні цього опису.

У багатьох випадках об'єкти описуються тут як пов'язані з іншими об'єктами. Потрібно зрозуміти, що терміни "зв'язаний (-а, -е, -і)" і "з'єднаний (-а, -е, -і)" або будь-які з їхніх форм вживаються тут взаємозамінно і в обох випадках є родовими для безпосереднього зв'язку двох об'єктів (без яких-небудь істотних (наприклад - паразитних) проміжних об'єктів) і непрямого зв'язку двох об'єктів (з одним або декількома проміжними об'єктами). Якщо об'єкти показані як безпосередньо зв'язані воедино або описані як зв'язані воедино без опису якого-небудь проміжного об'єкта, потрібно зрозуміти, що ці об'єкти також можуть бути безпосередньо зв'язані воедино, якщо в контексті явно не диктується інше.

Хоча варіанти здійснення можуть бути піддані внесенню різних модифікацій і альтернативних форм, їхні конкретні приклади показані на кресленнях і описані тут детально. Однак повинно бути зрозуміло, що ці варіанти здійснення не обмежуються розкритою конкретною формою, а навпаки, ці варіанти здійснення потрібно вважати такими, що охоплюють всі модифікації, еквіваленти і альтернативи, які знаходяться в межах істоти винаходу. Крім цього, наводити у формулі винаходу або вносити в неї можна будь-які ознаки, функції, етапи або елементи згідно з варіантами здійснення, а також негативні обмеження, які визначають обсяг охорони згідно з винаходом ознаками, функціями, етапами або елементами, що знаходяться поза цим обсягом.



Фіг. 1



Фіг. 2

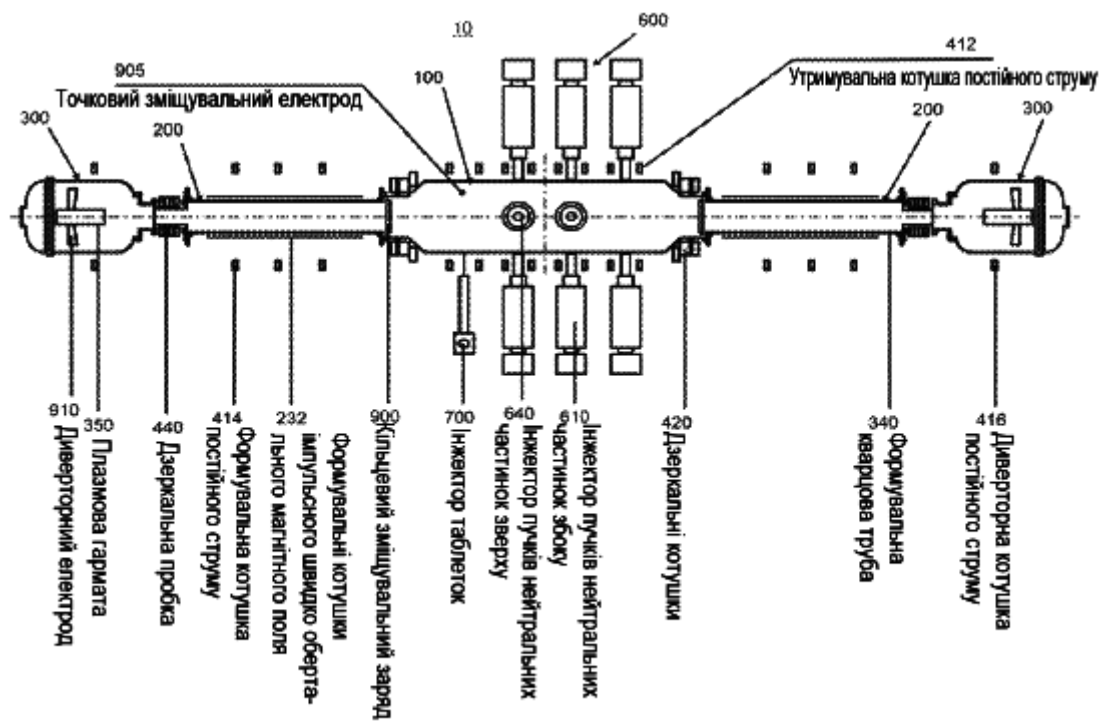


Fig. 3A

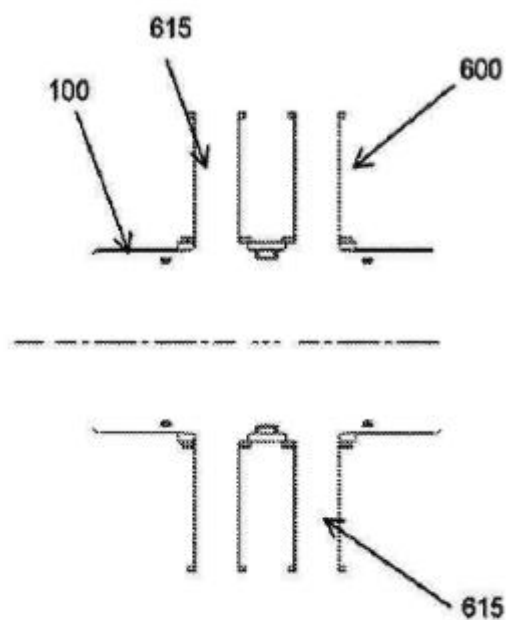


Fig. 3B

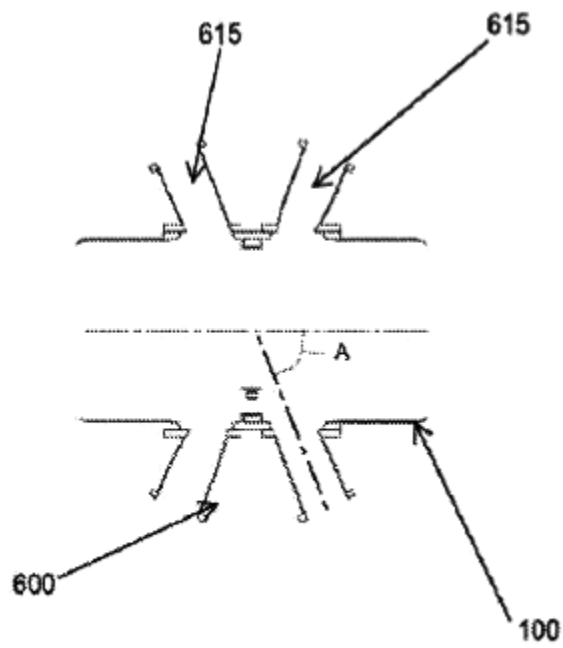


Fig. 3C

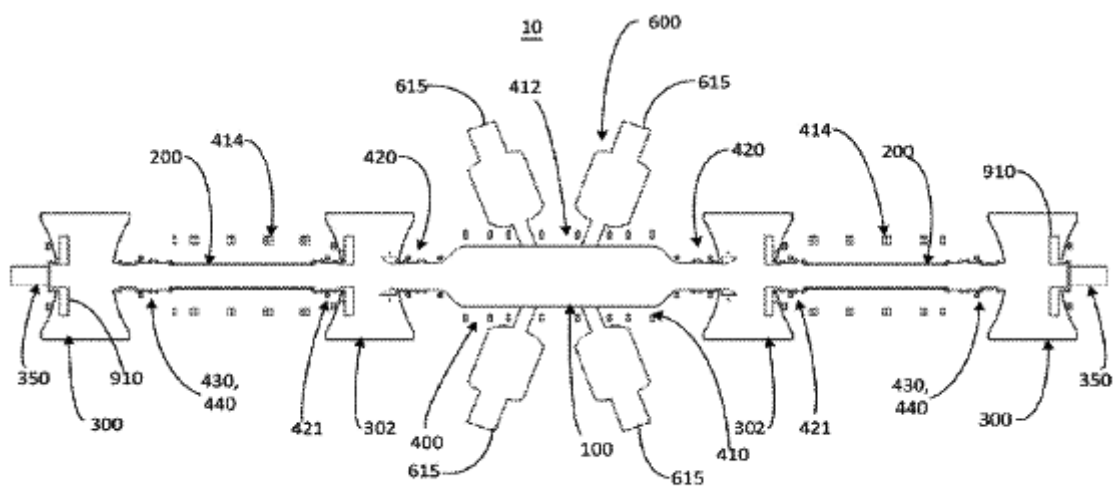
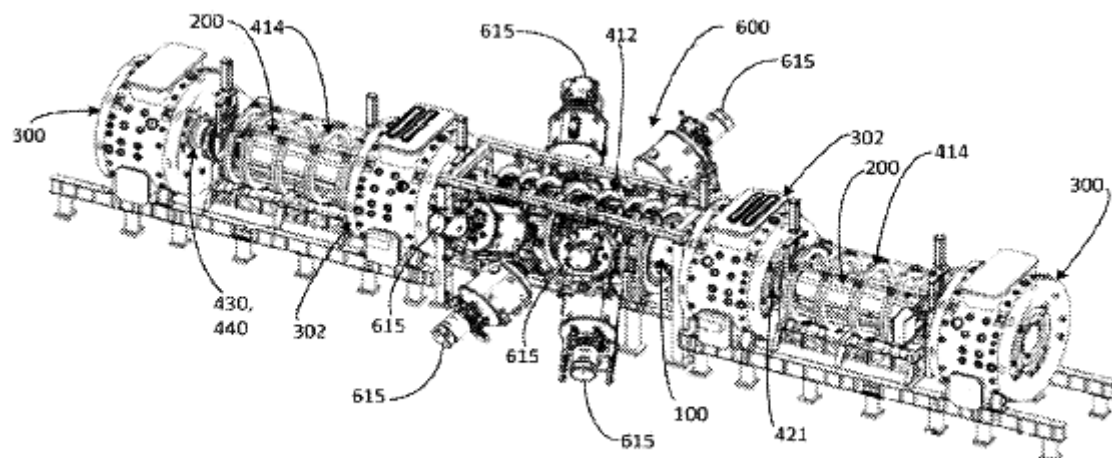
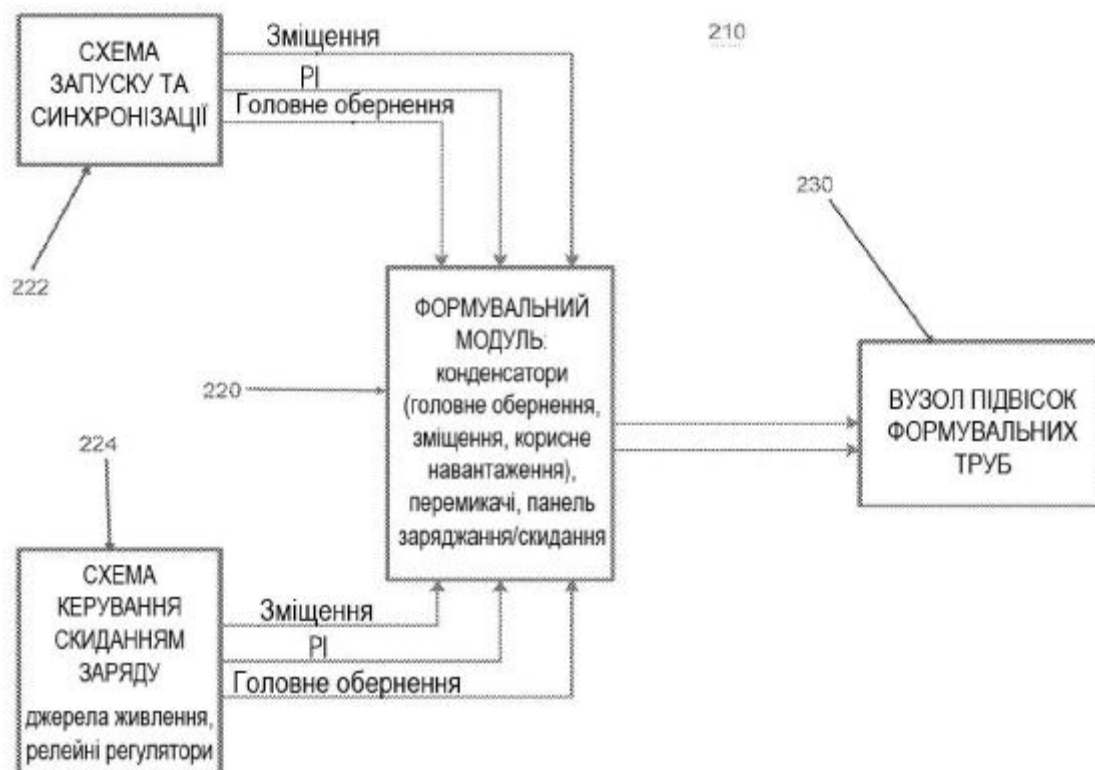


Fig. 3D



Фіг. 3Е



Фіг. 4

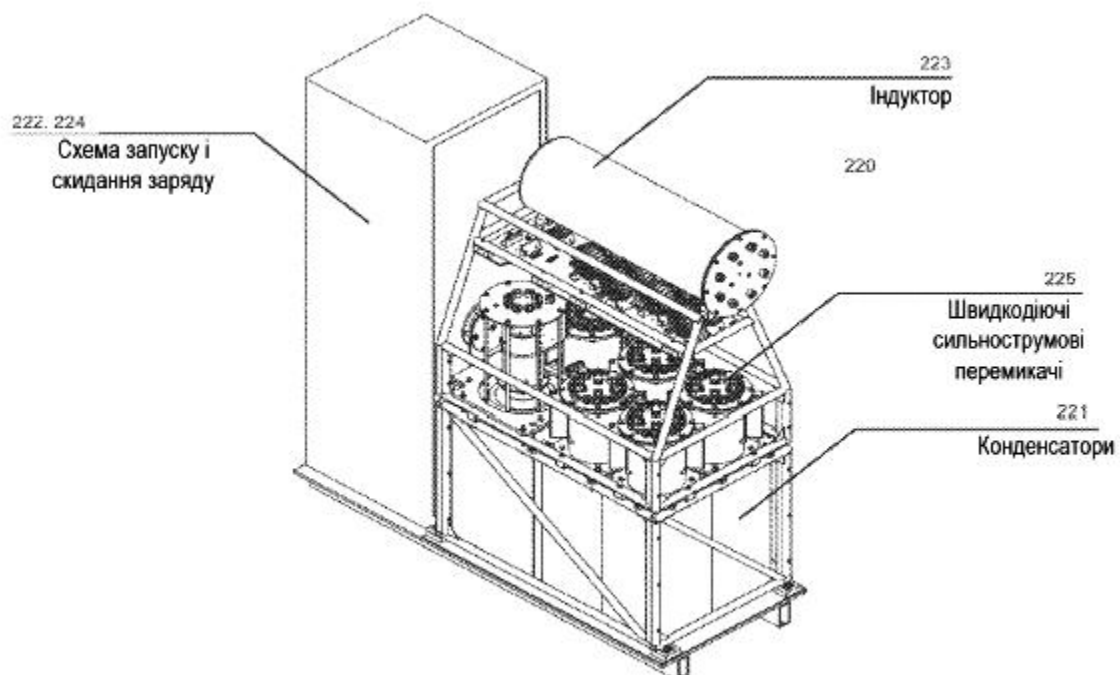


Fig. 5

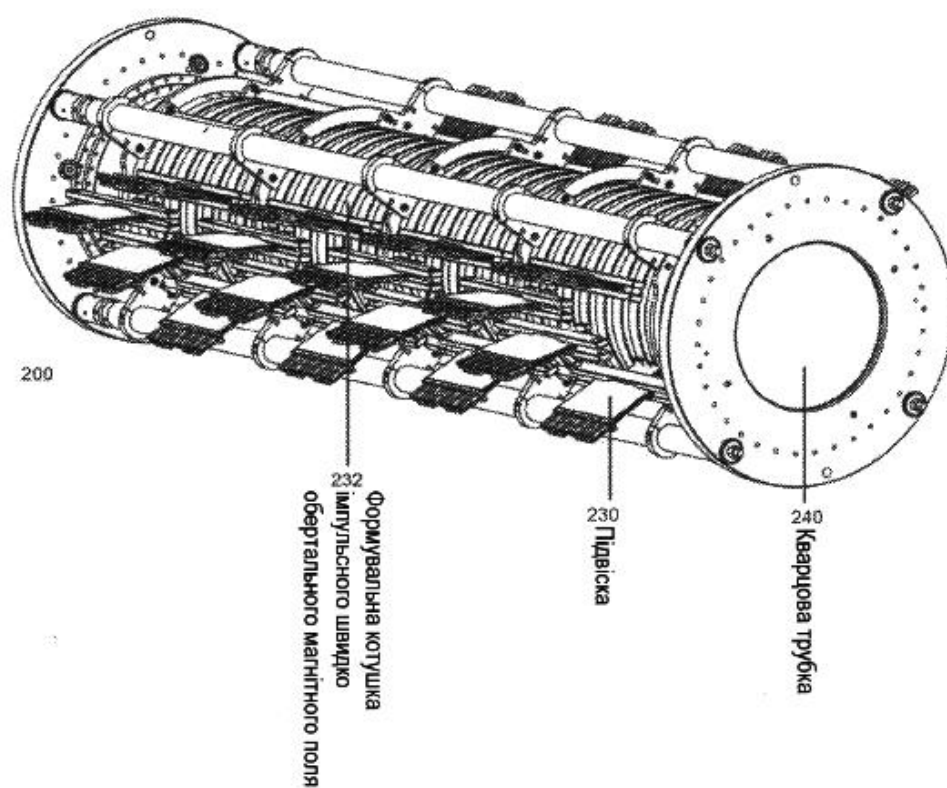
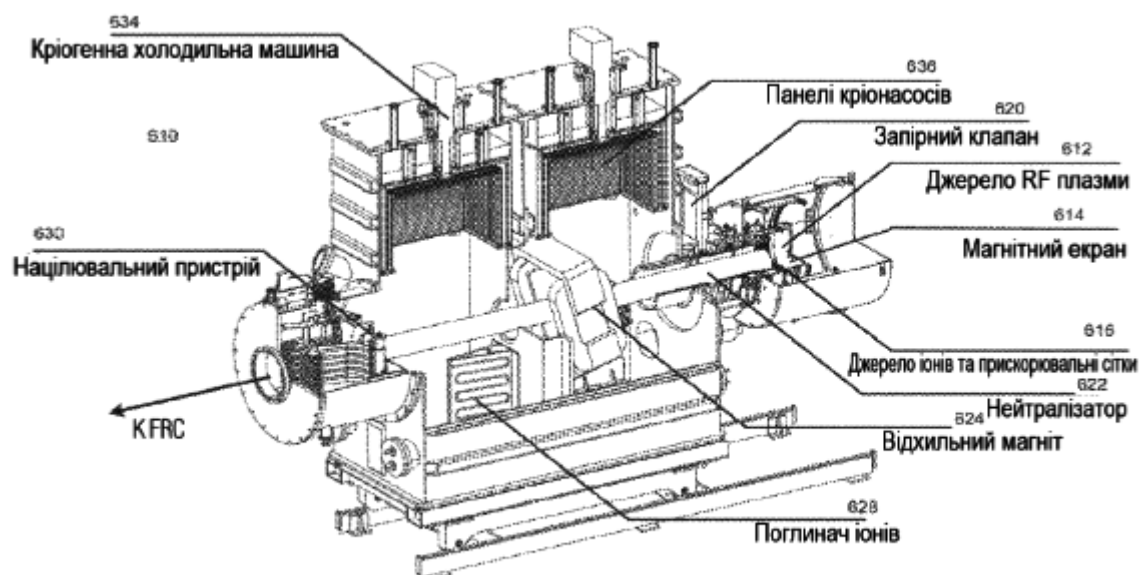
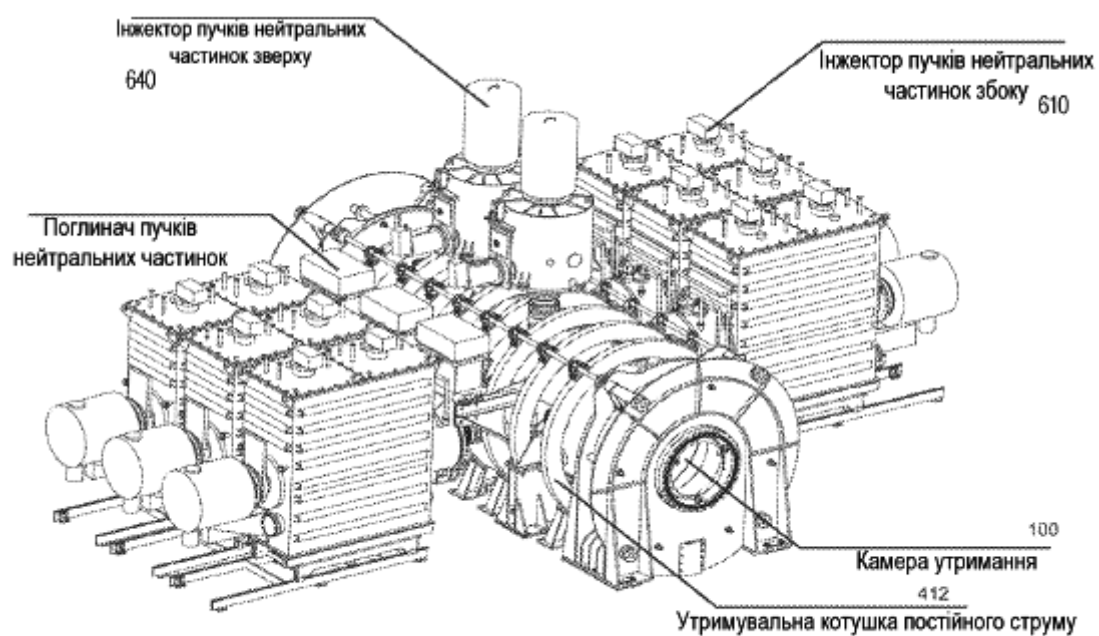


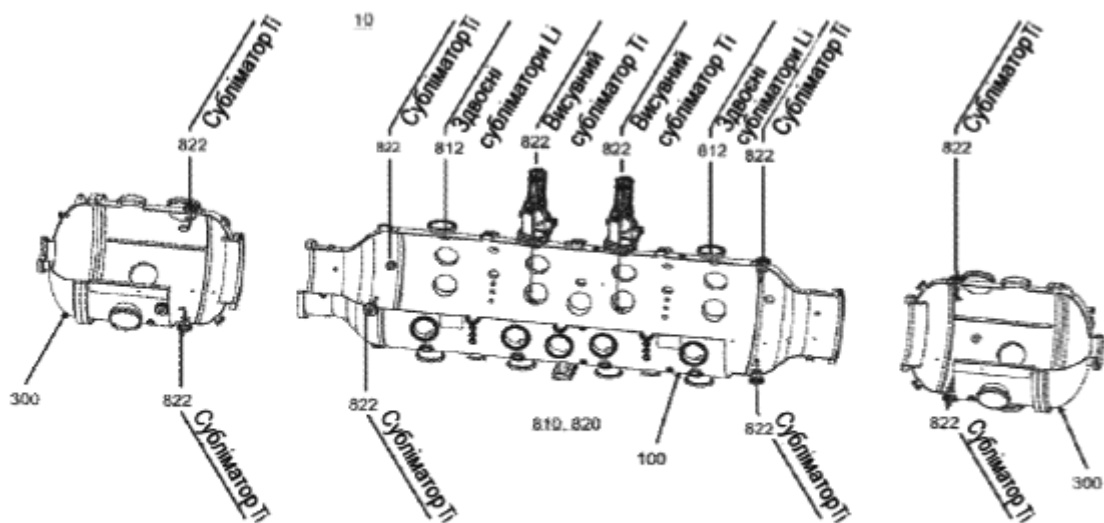
Fig. 6



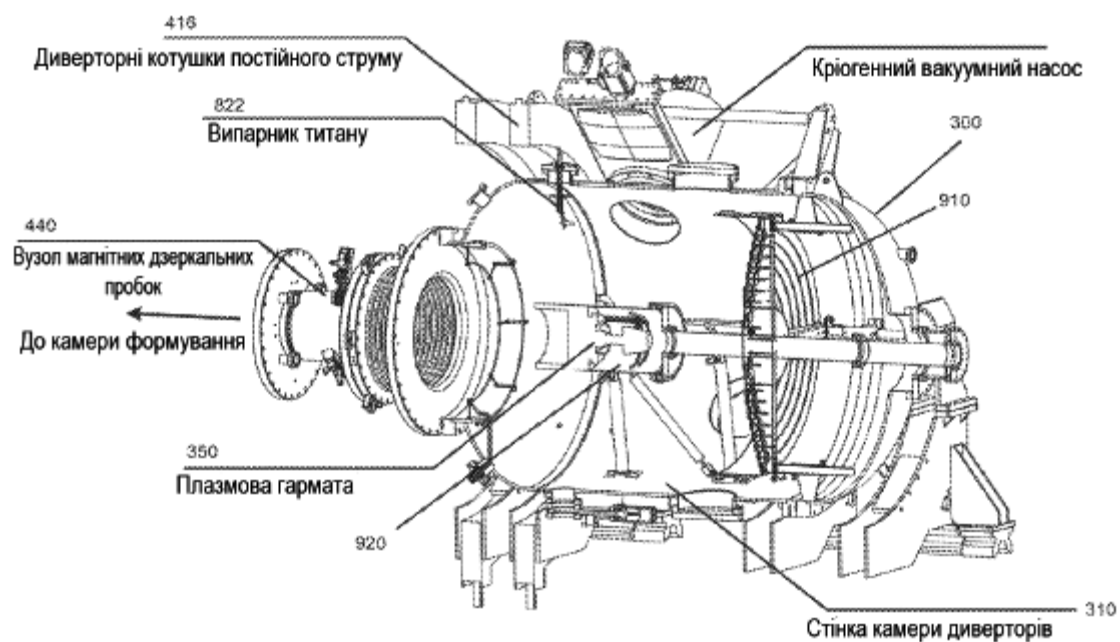
Фіг. 7



Фіг. 8



Фіг. 9



Фіг. 10

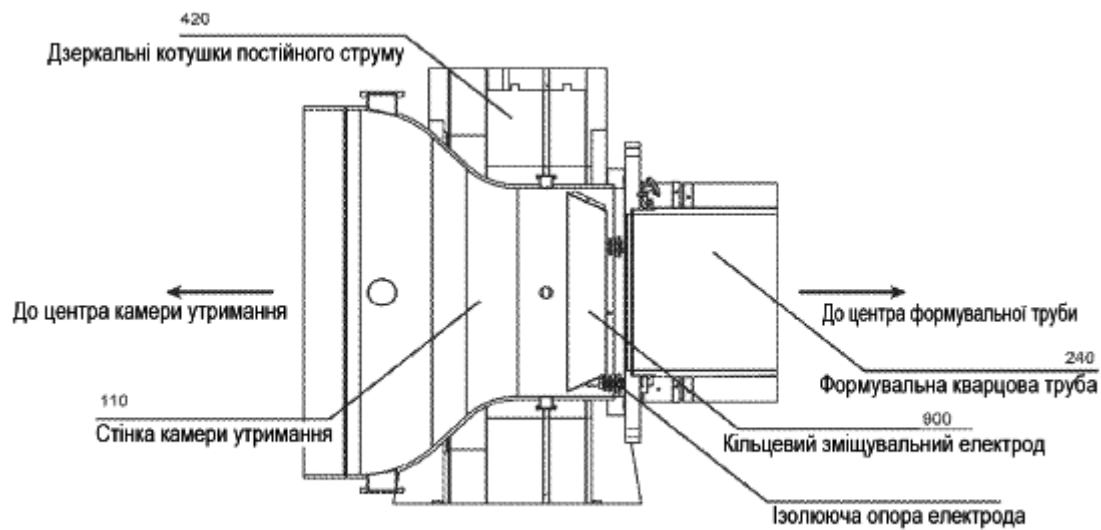


Fig. 11

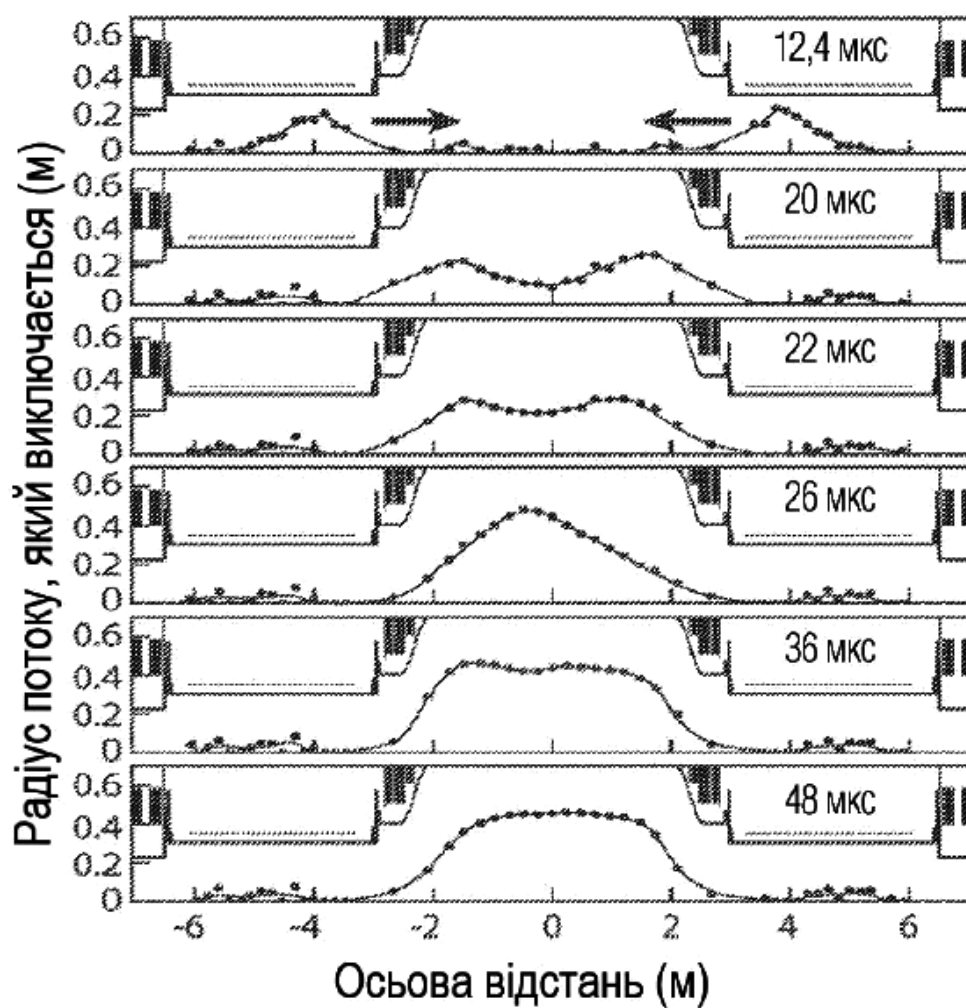
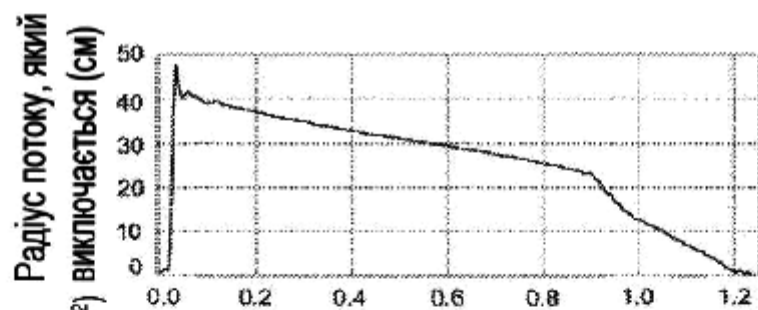
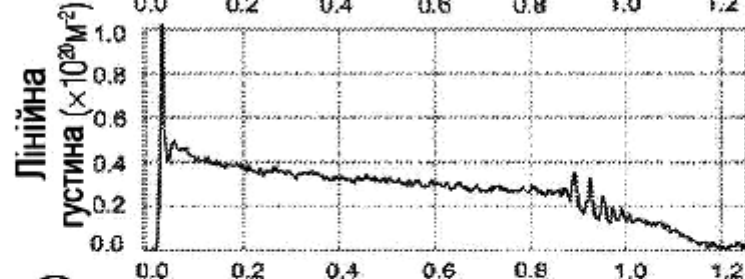


Fig. 12

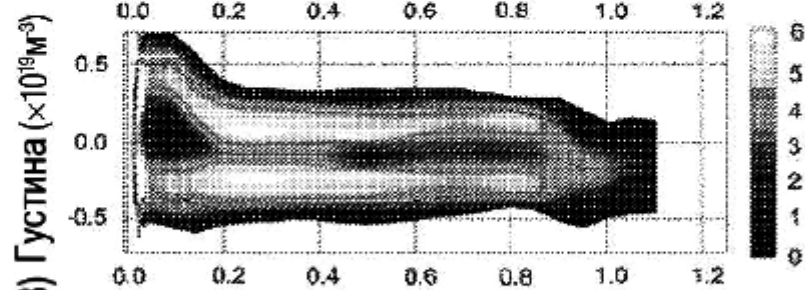
Фиг. 13A



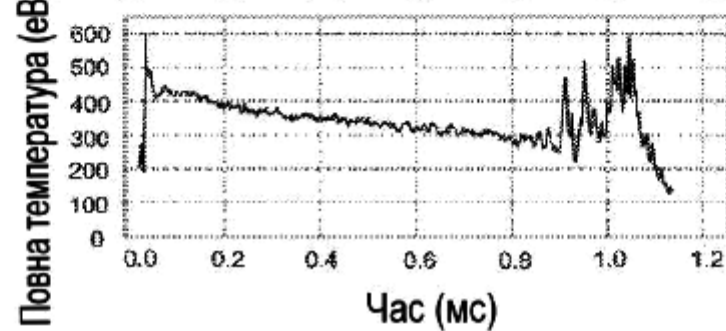
Фиг. 13B

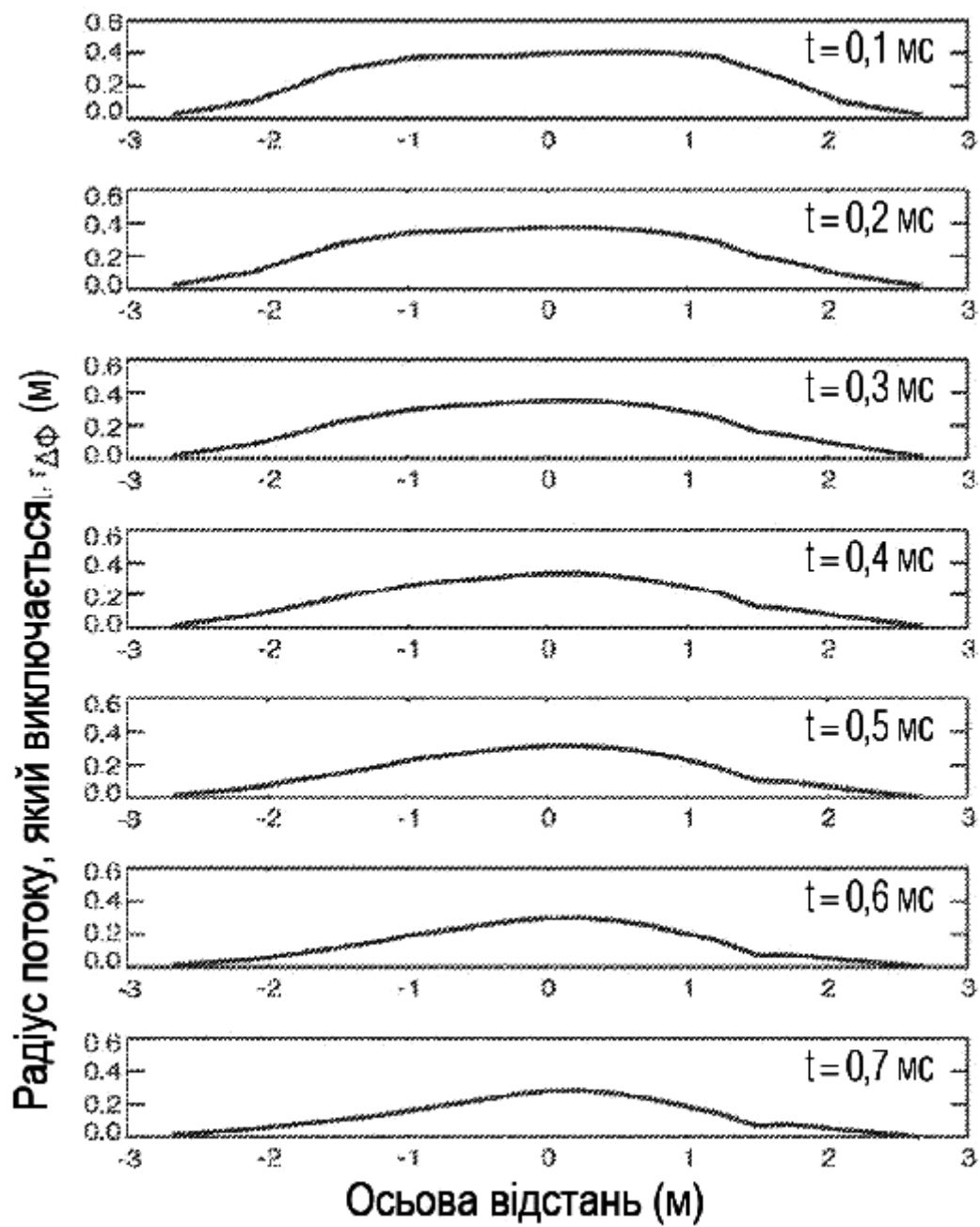


Фиг. 13C



Фиг. 13D





Фіг. 14

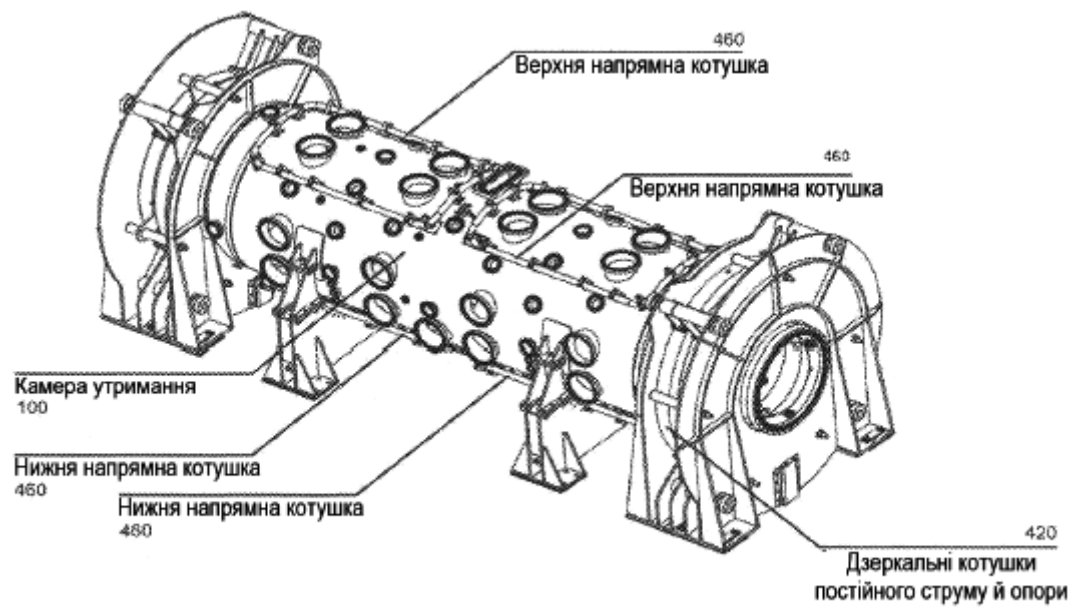


Fig. 15

Fig. 16A

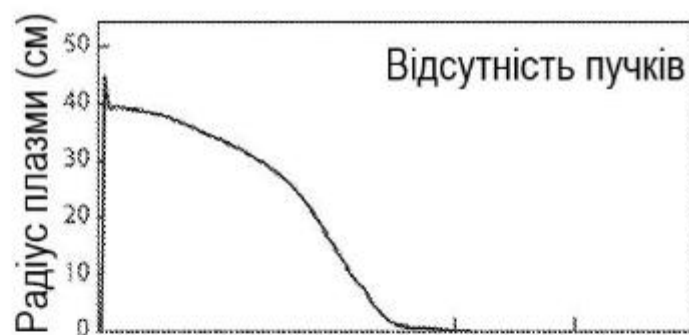


Fig. 16B

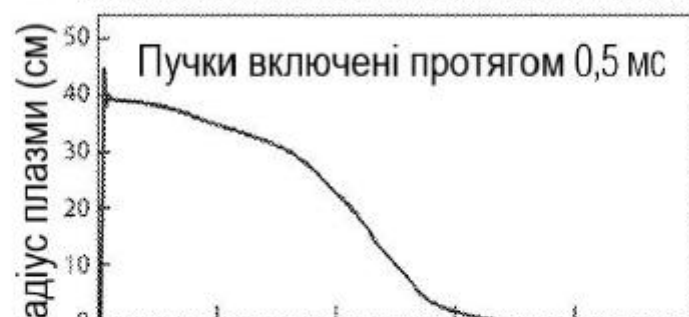
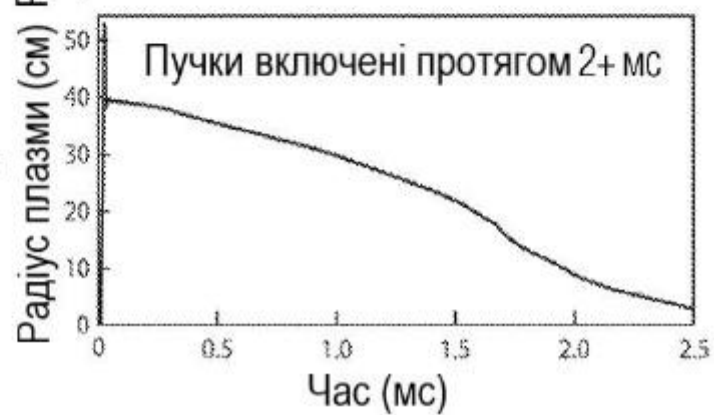


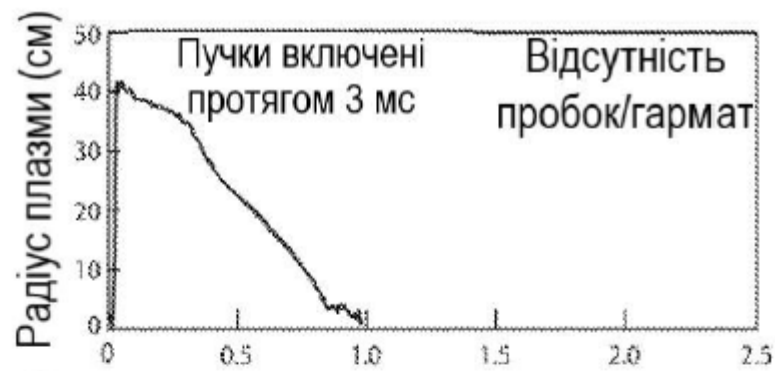
Fig. 16C



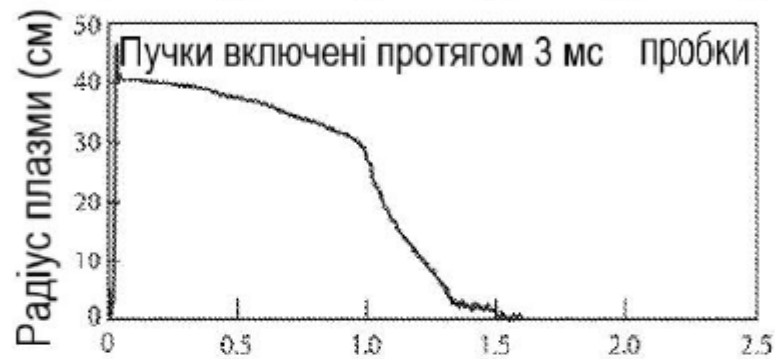
Fig. 16D



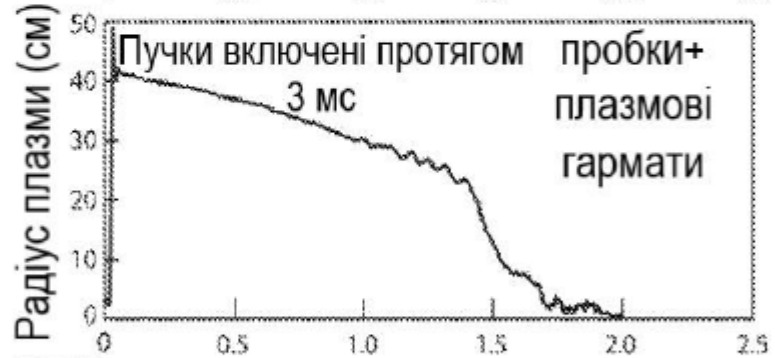
Фіг. 17А



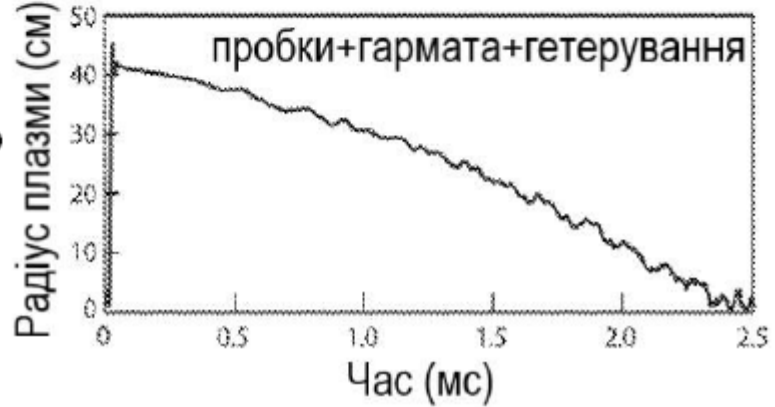
Фіг. 17В



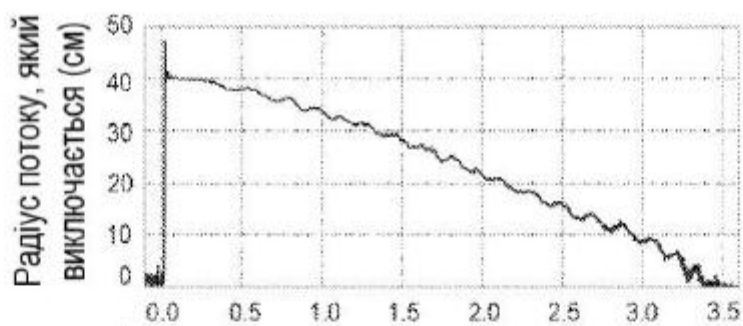
Фіг. 17С



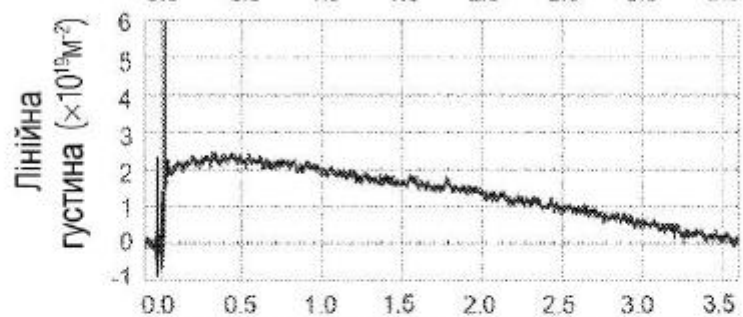
Фіг. 17D



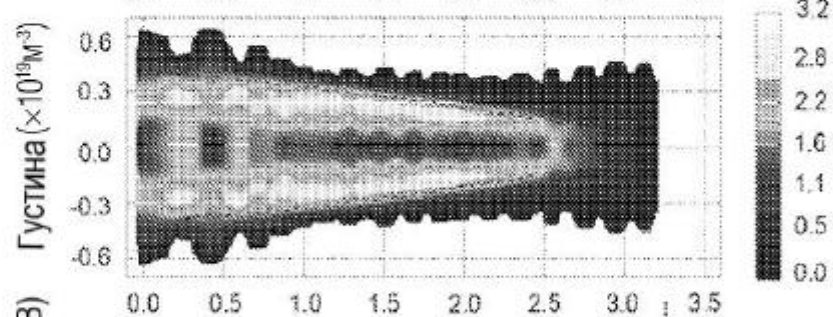
Фиг. 18А



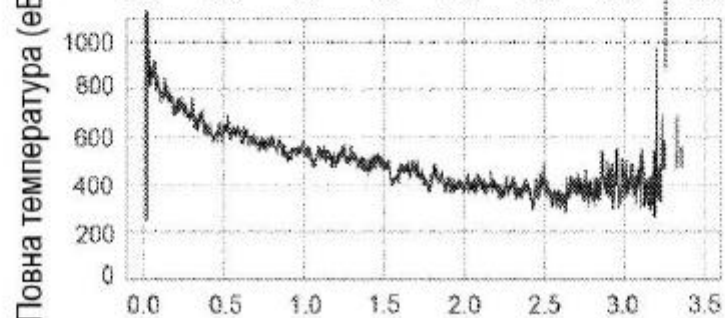
Фиг. 18В



Фиг. 18С



Фиг. 18D



Час (мс)

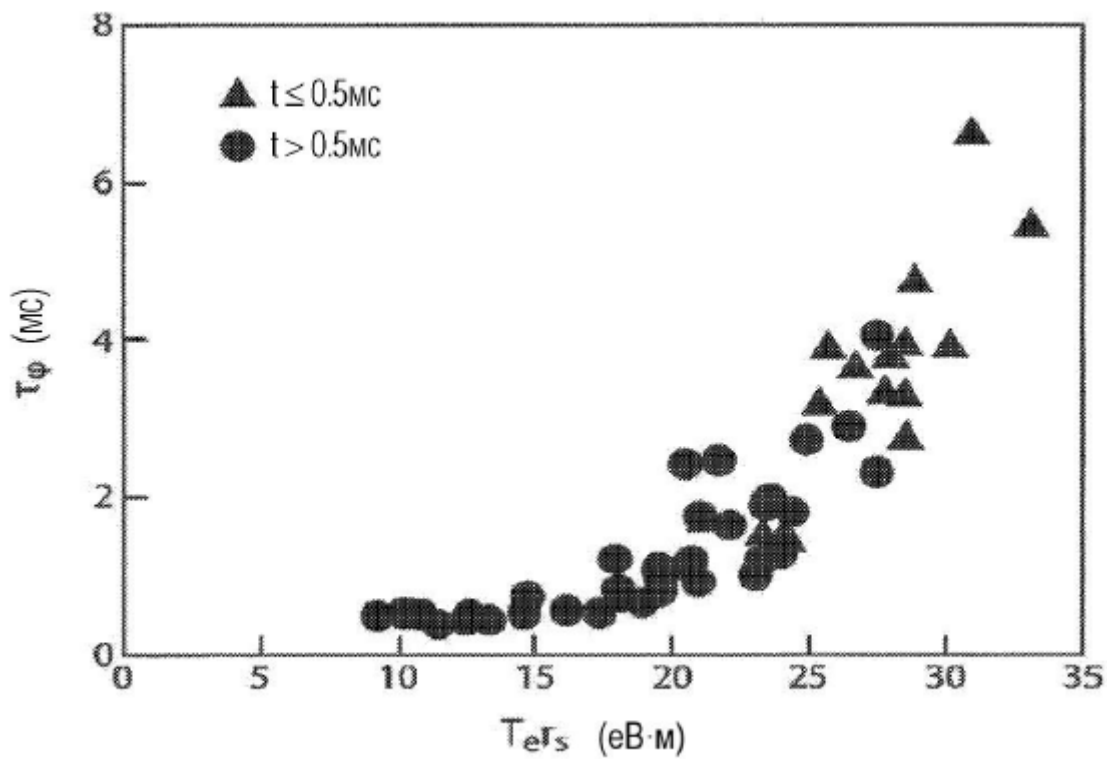


Fig. 19

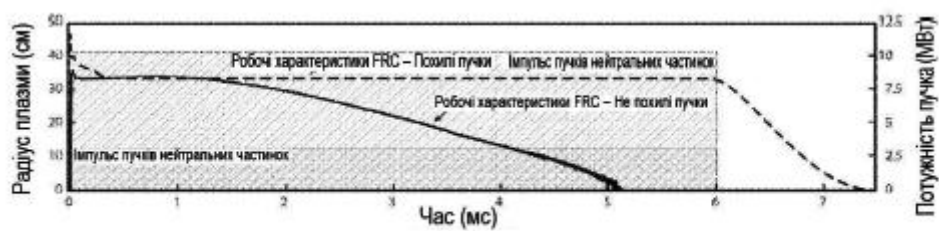
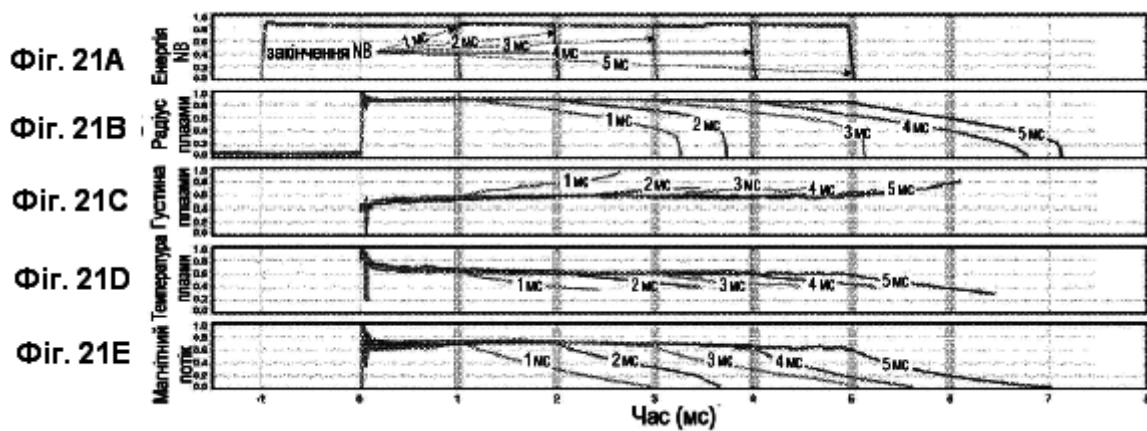
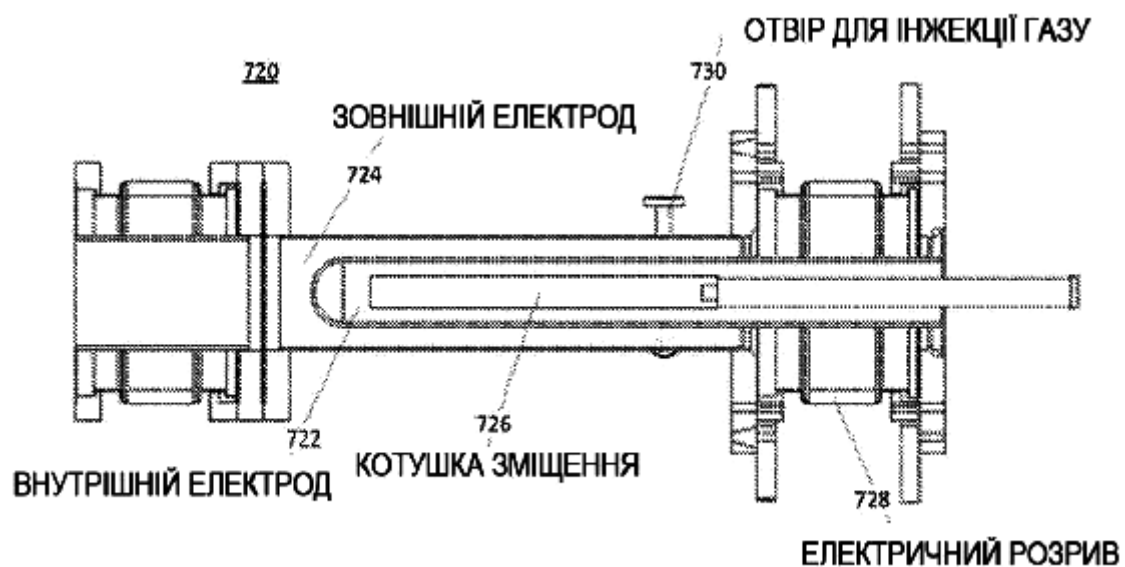
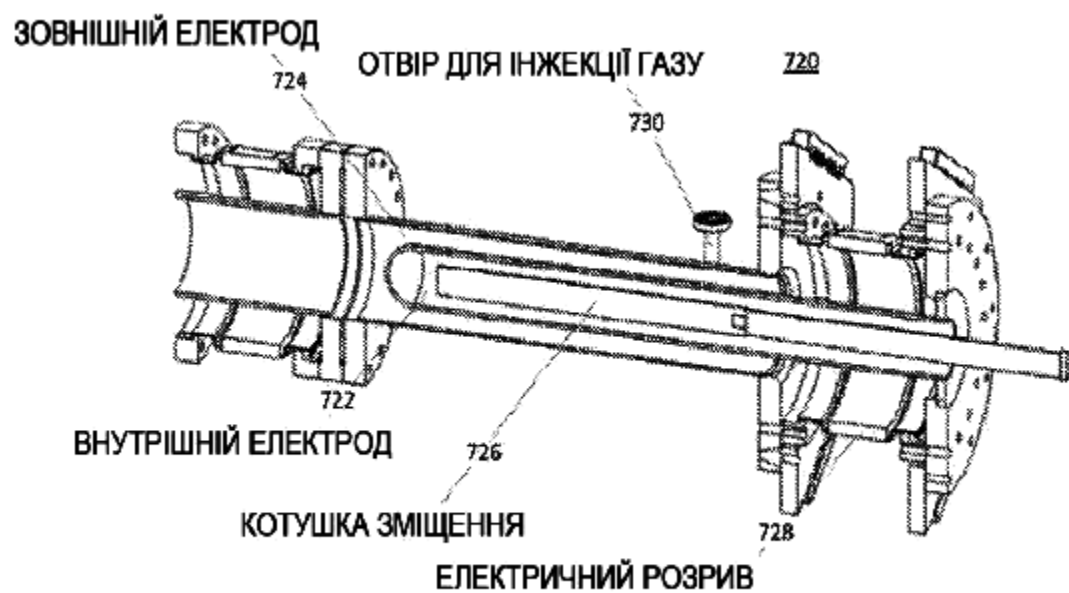


Fig. 20





Фиг. 22А



Фиг. 22В

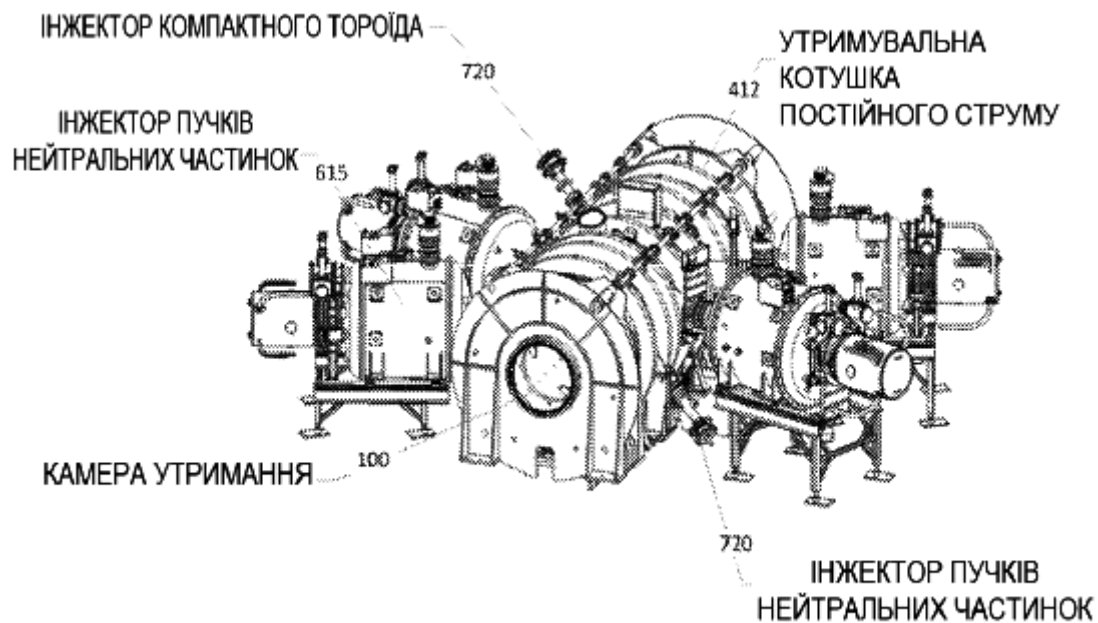


Fig. 23A

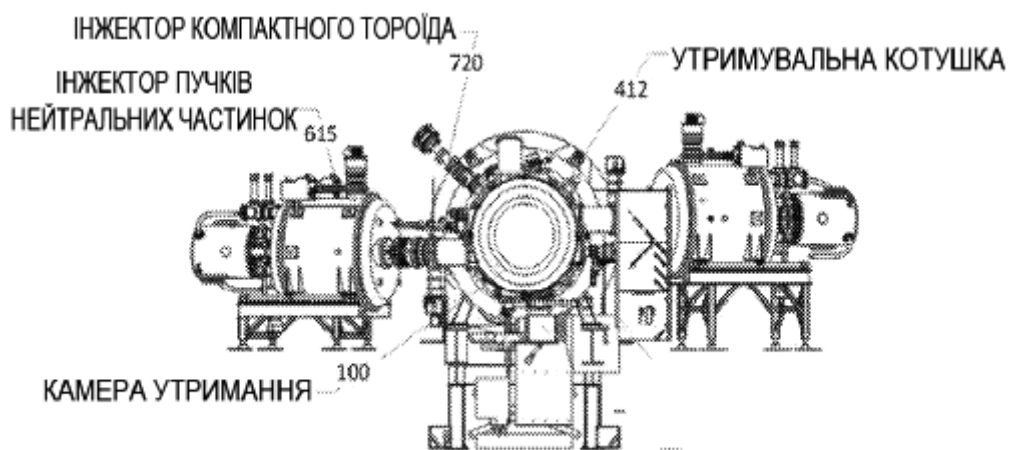


Fig. 23B

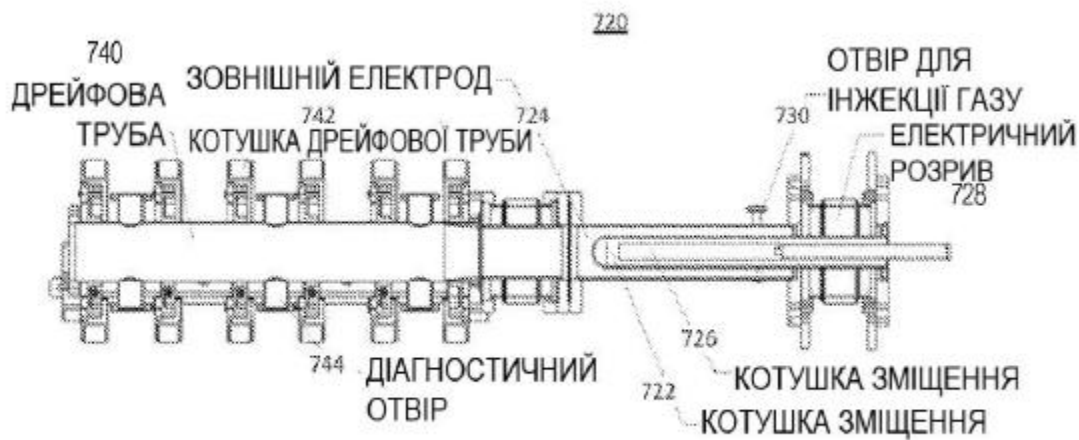
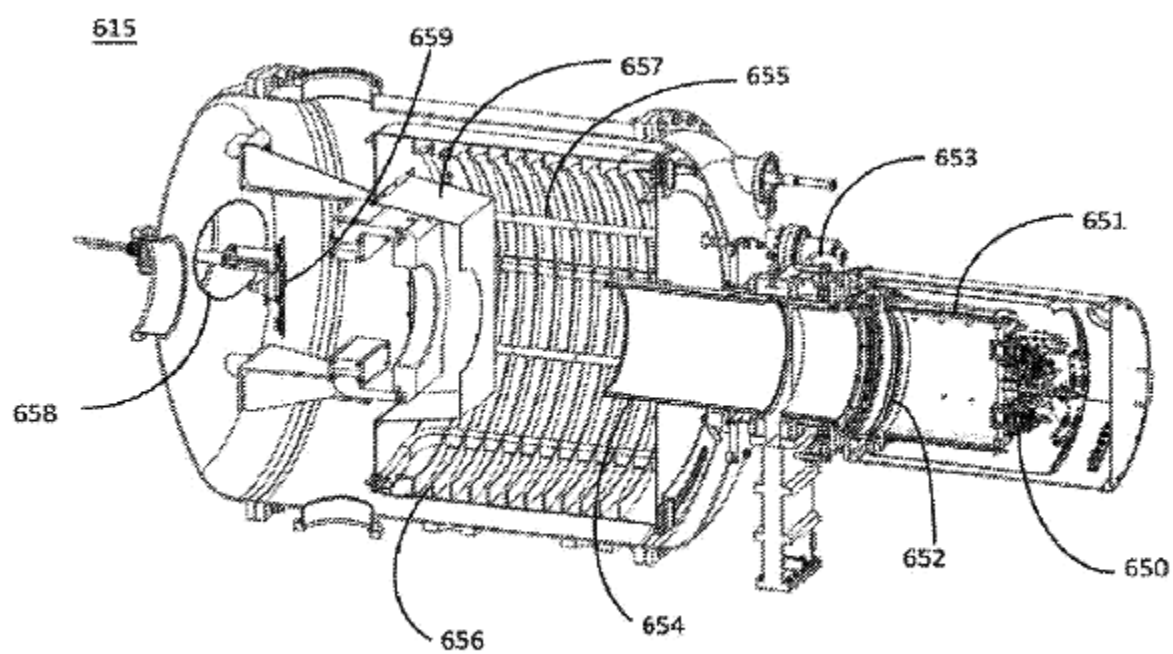
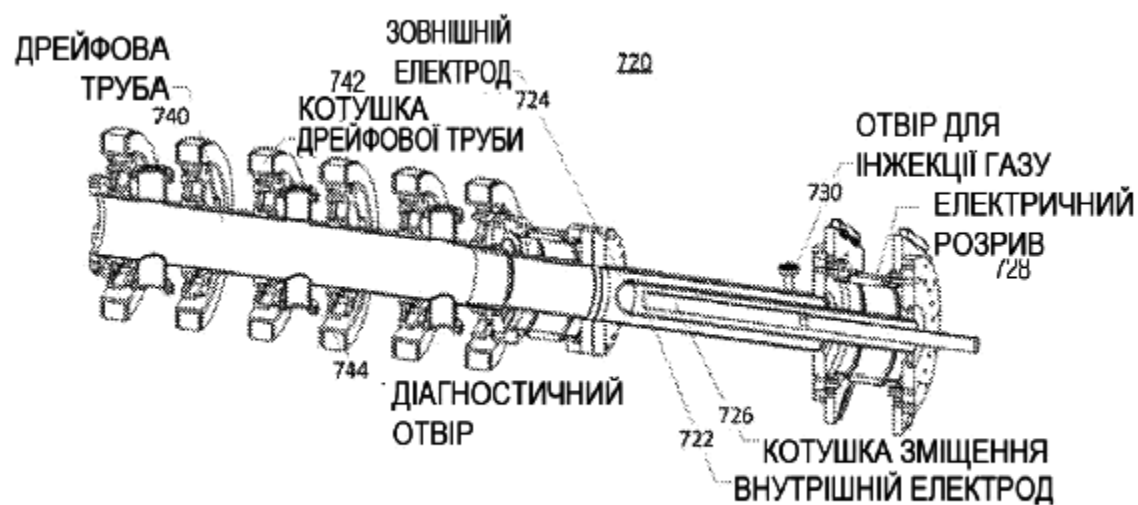
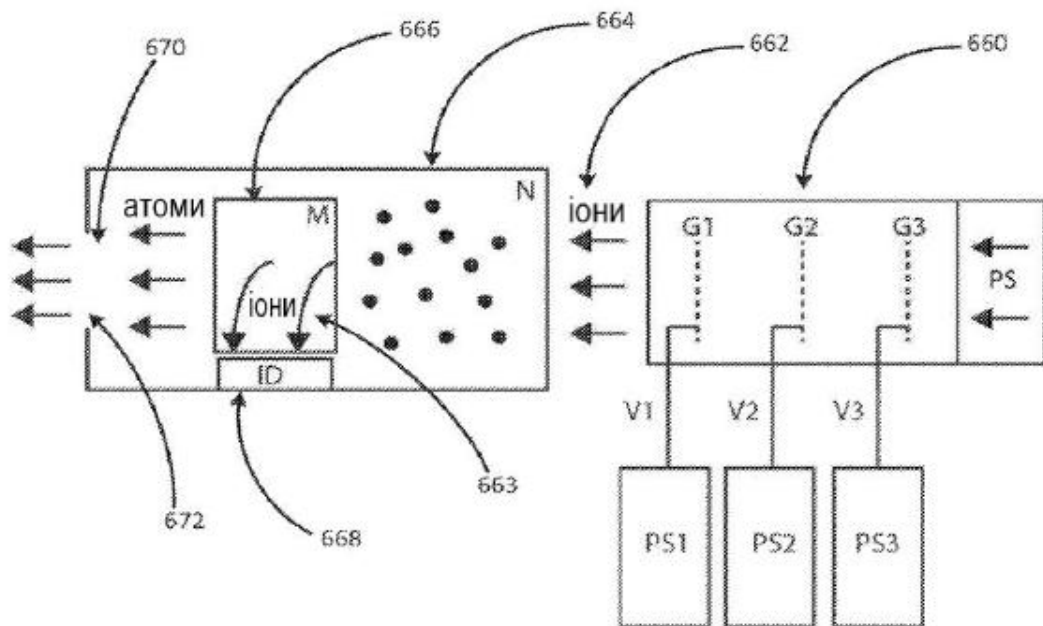
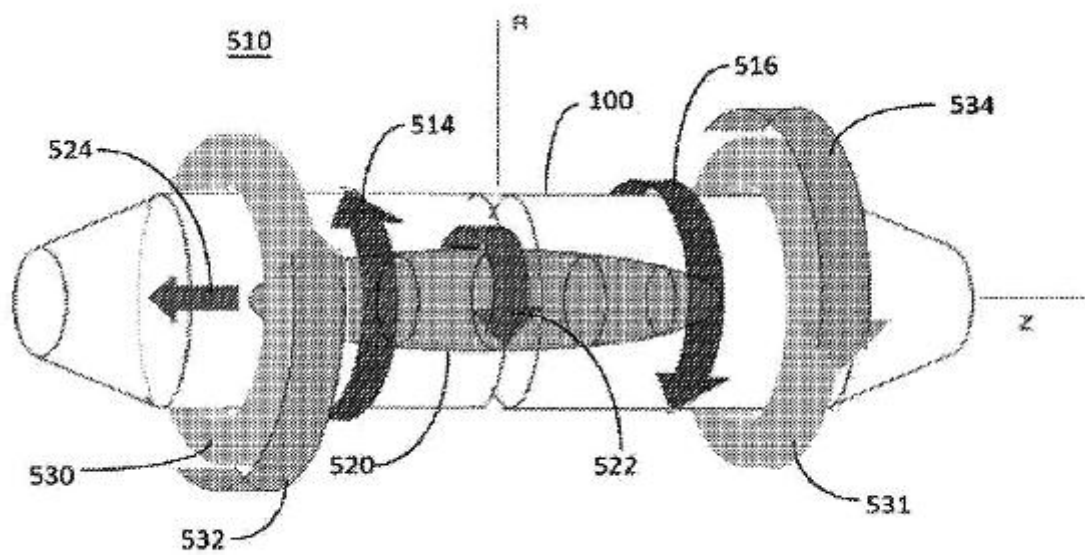


Fig. 24A





Фиг. 26



Фиг. 27

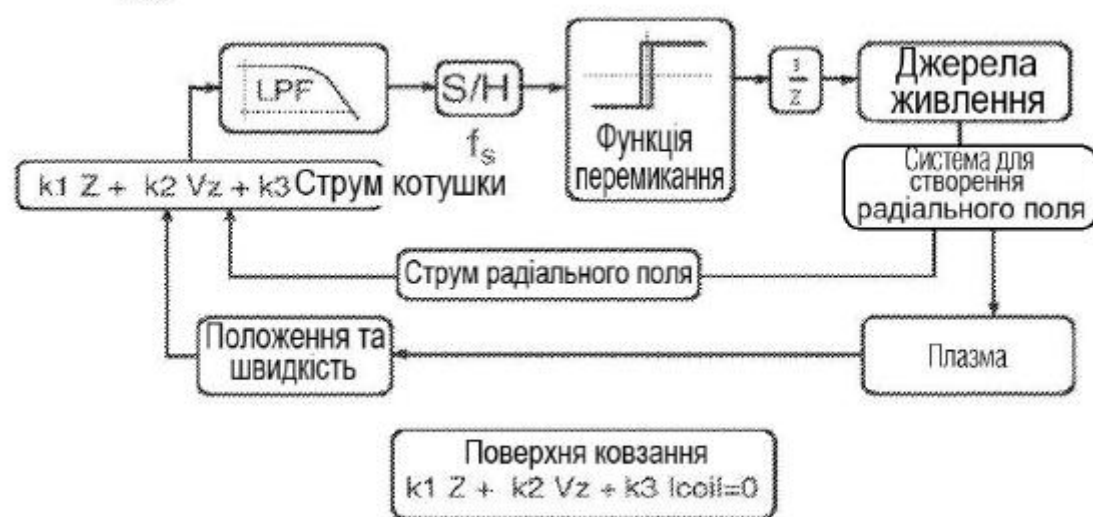


Fig. 28

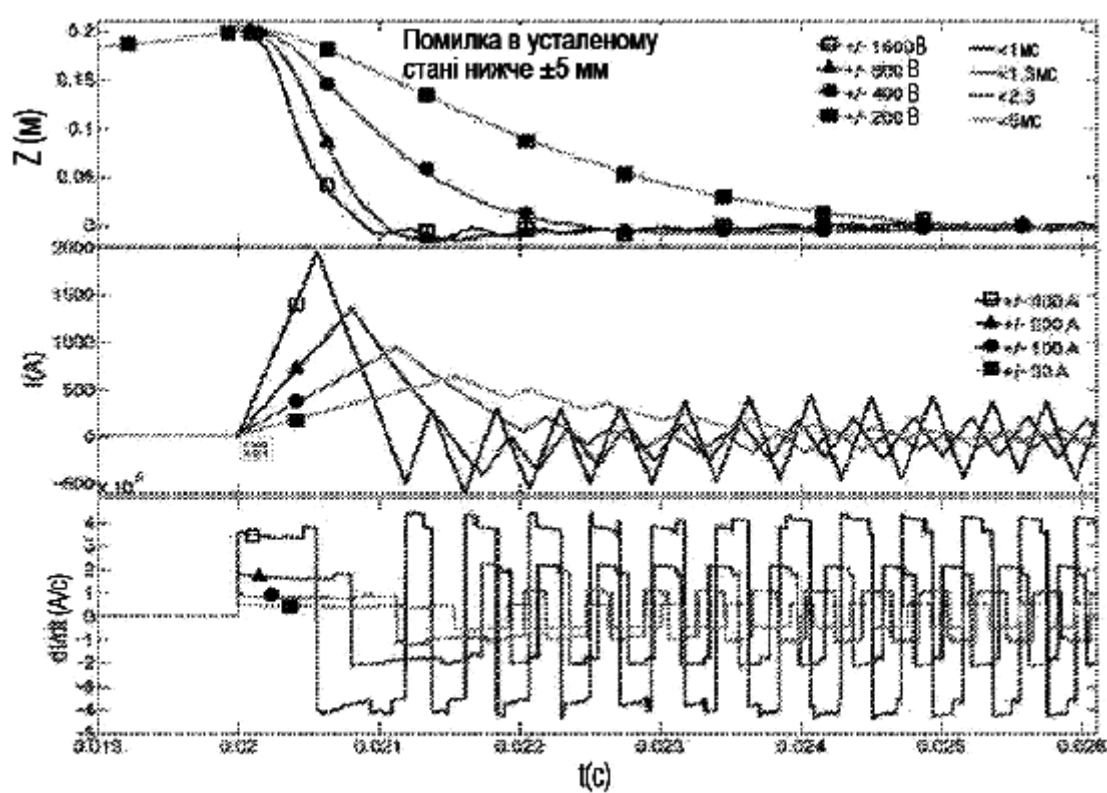
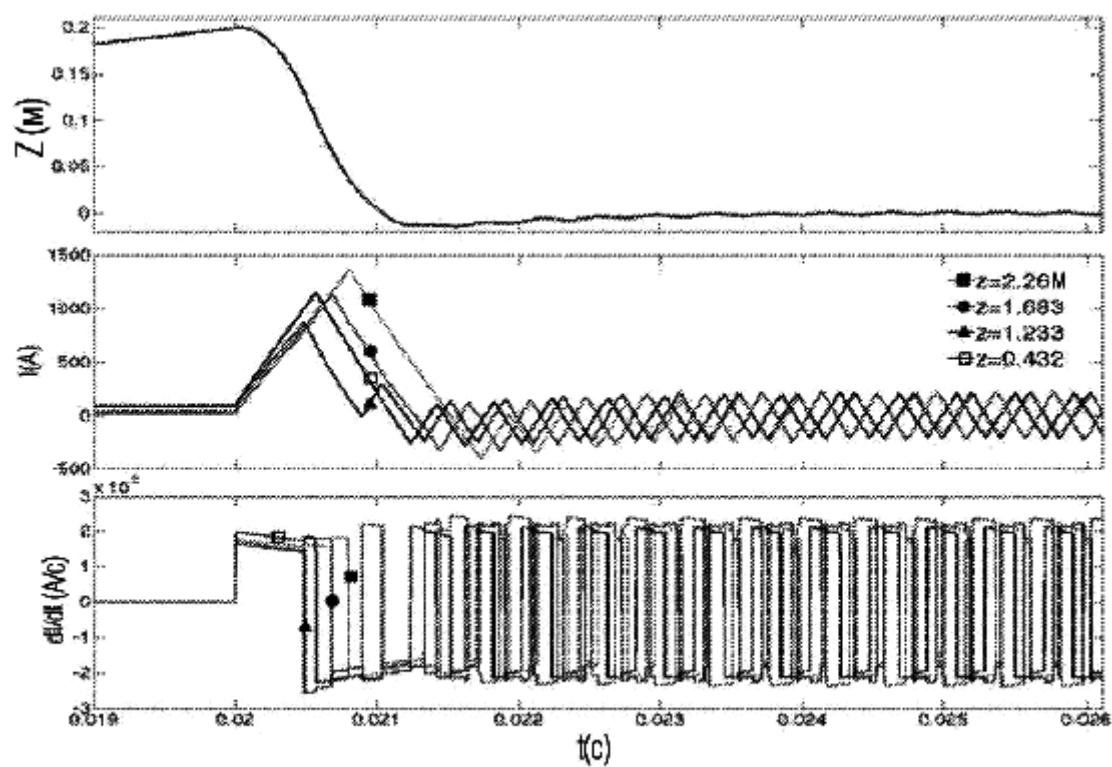
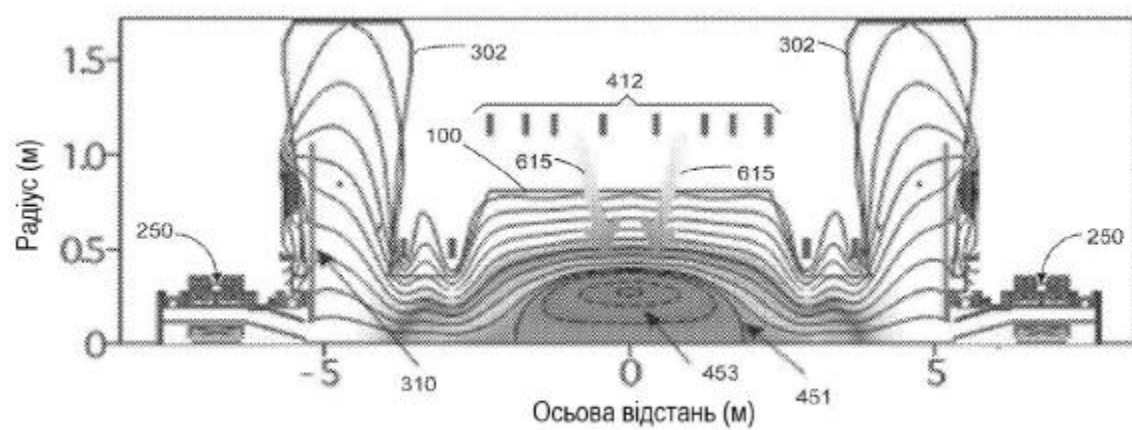


Fig. 29



Фиг. 30



Фиг. 31A

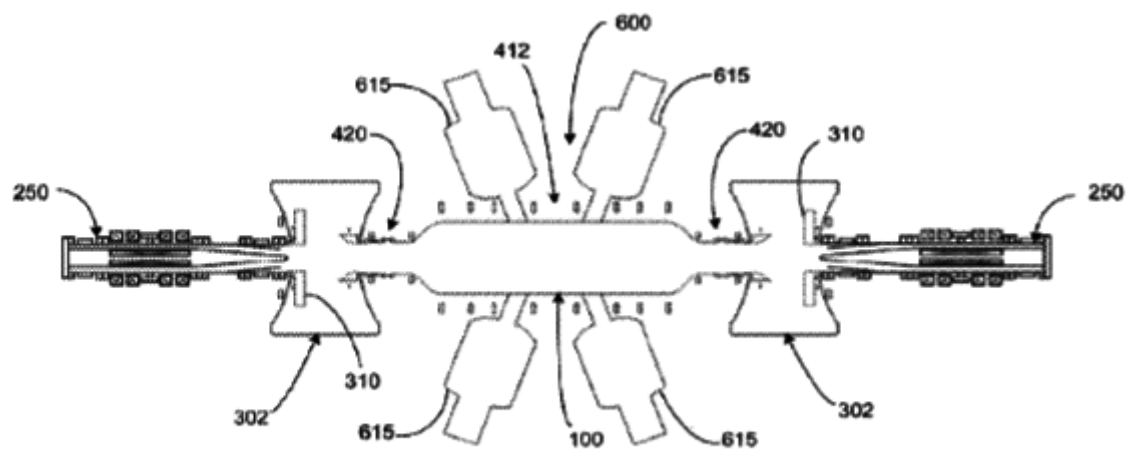


Fig. 31B

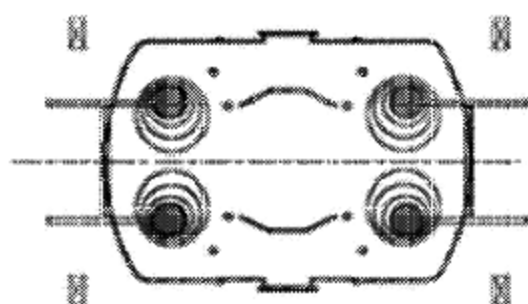


Fig. 32A

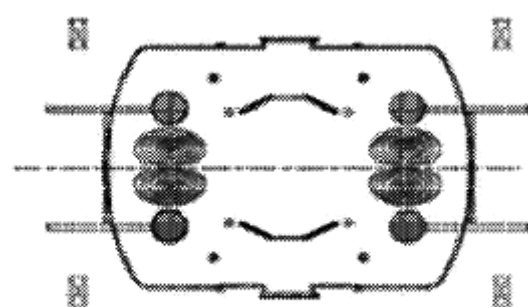


Fig. 32B

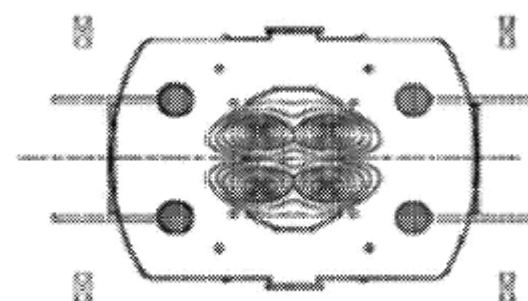
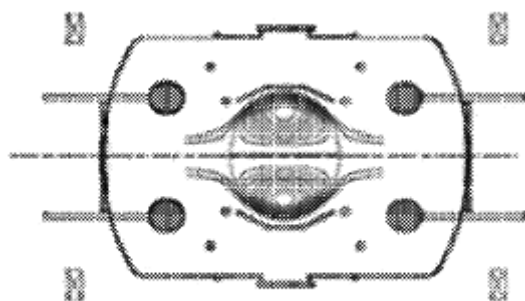
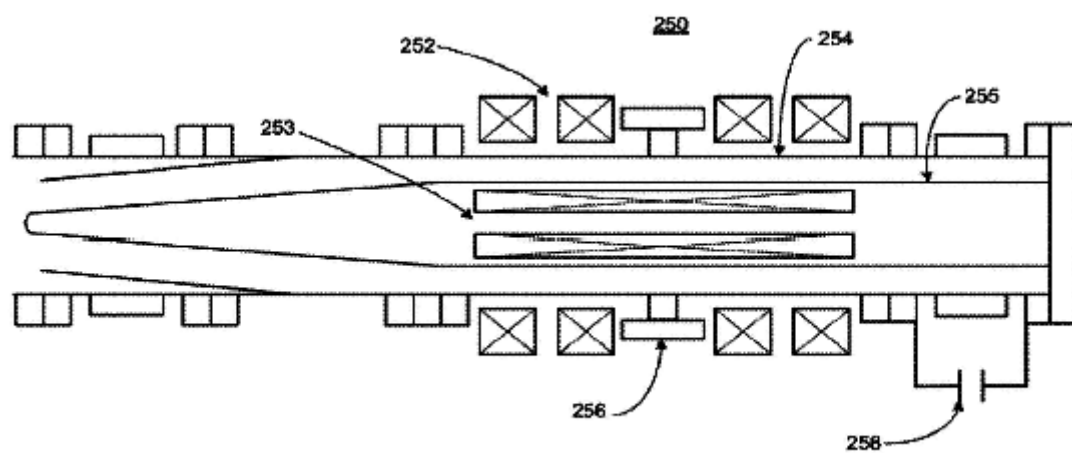


Fig. 32C



Φir. 32D



Φir. 33