



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **126267** (13) **C2**  
(51) МПК (2022.01)  
**H05H 1/14** (2006.01)  
**H05H 1/16** (2006.01)  
**H05H 3/00**  
**H05H 1/08** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**

<p>(21) Номер заявки: <b>a 2017 05187</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>30.10.2015</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>15.09.2022</b></p> <p>(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>62/072,611</b></p> <p>(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>30.10.2014</b></p> <p>(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку: <b>US</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: <b>10.08.2017, Бюл.№ 15</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>14.09.2022, Бюл.№ 37</b></p> <p>(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ: <b>PCT/US2015/058473, 30.10.2015</b></p> <p>(72) Винахідник(и): <b>Біндербауер Міхль (US), Гарате Еусебіу (US), Путвінські Сергій (US), Гота Хіросі (US)</b></p>	<p>(73) Володілець (володільці): <b>ТАЄ ТЕКНОЛОДЖІС, ІНК.,</b> 19631 Pauling, Foothill Ranch, California 92610, United States of America (US)</p> <p>(74) Представник: <b>Бочаров Максим Анатолійович, реєстр. №367</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: Tuszewski, M. et al. "Combined FRC and mirror plasma studies in the C-2 device." Fusion Science and Technology 59, no. 1T (2011): 23-26. Raman, R. "Fuelling Requirements for Advanced Tokamak operation." In 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, pp. 1-4. 2005. Guo, H. Y. et al. "Formation of a long-lived hot field reversed configuration by dynamically merging two colliding high-<math>\beta</math> compact toroids." Physics of Plasmas 18, no. 5 (2011): 056110. Smirnov, A. et al. "Neutral Beam Dump Utilizing Cathodic Arc Titanium Evaporation." Fusion Science and Technology 59, no. 1T (2011): 271-273. US 4166760 A, 04.09.1979 US 6852942 B2, 08.02.2005 US 4601871 A, 22.07.1986 WO 2013/074666 A2, 23.05.2013 Okada, S. et al. "Experiments on additional heating of FRC plasmas." Nuclear fusion 41, no. 5 (2001): 625. WO 2010/089670 A1, 12.08.2010 WO 2015/048092 A1, 02.04.2015</p>
--	---

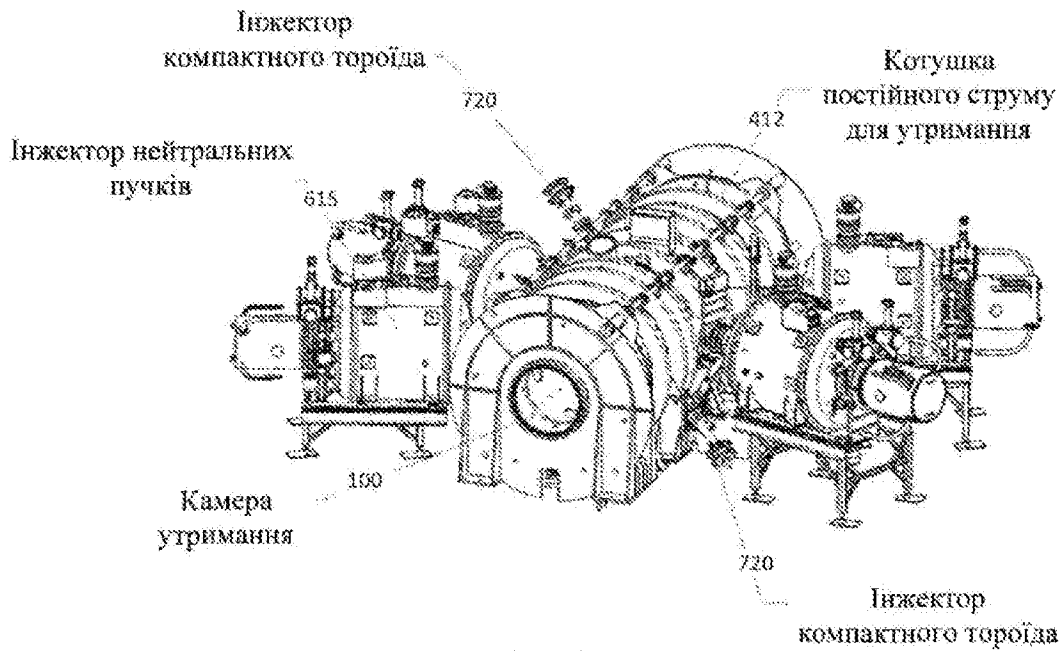
**(54) СИСТЕМИ І СПОСОБИ ФОРМУВАННЯ І ПІДТРИМАННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ З ОБЕРНЕНИМ ПОЛЕМ**

**(57) Реферат:**

Запропонована вискоефективна конфігурація з оберненим полем (FRC) включає в себе центральну місткість для утримання, дві діаметрально протилежні формуючі секції тета-пінчів з оберненим полем, пов'язані із згаданою місткістю, і дві камери диверторів, пов'язані з формуючими секціями. Магнітна система включає в себе котушки квазіпостійного струму, розташовані аксіально вздовж компонентів FRC-системи, дзеркальні котушки квазіпостійного

UA 126267 C2

струму між камерою утримання і формуючими секціями і дзеркальні пробки між формуючими секціями і диверторами. Формуючі секції включають в себе модульні формуючі системи імпульсного живлення, що дозволяють здійснювати статичне і динамічне формування, а також прискорення FRC. FRC-система додатково включає в себе інжектори пучків нейтральних атомів, інжектори таблеток або КТ, системи гетерування, осьові плазмові гармати і електроди, що зміщують поверхні потоку. Інжектори пучків переважно нахилені до середньої площини камери. У процесі роботи параметри FRC-плазми, включаючи термічну енергію плазми, загальні кількості частинок, радіус і захоплюваний магнітний потік, підтримуються на або приблизно на постійному значенні без спаду під час інжекції пучків нейтральних частинок.



Фіг. 22А

Галузь винаходу

[0001] Описувані тут варіанти здійснення стосуються в основному систем для магнітного утримання плазми, а більш конкретно систем і способів, які сприяють формуванню і підтриманню конфігурацій з оберненим полем з чудовою стійкістю, а також утриманню частинок, енергії і потоку.

Інформація про рівень техніки

[0002] Конфігурація з оберненим полем (FRC) належить до класу топологій магнітного утримання плазми, відомих як компактні тороїди (КТ). Вона демонструє переважаючі полоїдальні магнітні поля і має нульові або малі самогенеровані тороїдальні поля (див. Tuszewski M., Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)). Перевагами такої конфігурації є її проста для побудови і підтримання геометрія, природний необмежений дивертор для здійснення енерговиділення і золовидалення, а також дуже високе  $\beta$  ( $\beta$ -відношення середнього тиску плазми до середнього тиску магнітного поля всередині FRC), тобто висока щільність потужності. Властивість високого  $\beta$  вигідна для економічної роботи і для застосування вдосконалених

анейтронних палив, таких як D-He<sup>3</sup> і p-B<sup>11</sup>. [0003] Традиційний спосіб формування FRC використовує технології  $\theta$ -пінча з оберненим полем, що дає гарячі високощільні плазми (див. Hoffman A. L. and Slough J. T., Nucl. Fusion 33, 27 (1993)). Різновидом цього є спосіб перенесення і захоплення, в якому плазма, утворювана в "джерелі" тета-пінча, більшою або меншою мірою негайно викидається з одного торця в камеру утримання. Потім плазмоїд, що переноситься, захоплюється між двома міцними дзеркалами на торцях камери (див., наприклад, Himura H., Okada S., Sugimoto S. and Goto S., 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, високочастотне або омичне нагрівання і т. д. Це розділення функцій джерела і утримання дає ключові інженерні переваги для потенційних майбутніх термоядерних реакторів. FRC довели свою виняткову стійкість до зовнішніх впливів, пристосованість до динамічного формування, перенесення і інтенсивних подій захоплення. Більше того, вони демонструють тенденцію допускати переважний стан плазми (див., наприклад, Guo H. Y., Hoffman A. L., Miller K. E. and Steinhauer L. C., Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). За останнє десятиріччя досягнутий значний прогрес в розвитку інших способів формування FRC: за допомогою об'єднання сфермаків з протилежно направленими спіральностями (див., наприклад, Ono Y., Inomoto M., Ueda Y., Matsuyama T. and Okazaki T., Nucl. Fusion, 39, 2001 (1999)) і за допомогою збудження струму обертовими магнітними полями (ОМП) (див., наприклад, Jones I. R., Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)), які також забезпечують додаткову стійкість.

[0004] Нещодавно був суттєво допрацьований метод зіткнення і об'єднання, запропонований вже давно (див., наприклад, Wells D. R., 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 в центрі камери утримання і об'єднуються, утворюючи складену FRC. При розробці і успішному проведенні одного з найбільш великомасштабних до теперішнього часу експериментів з FRC, звичайний спосіб зіткнення і об'єднання показав, що дає стійкі високотемпературні FRC з великим часом життя і великою щільністю потоку частинок (див., наприклад, Binderbauer M., Guo H.Y., Tuszewski M. et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)).

[0005] FRC складаються з тора силових ліній замкненого поля всередині сепаратриси і кільцевого граничного шару на лініях відкритого поля тільки зовні від сепаратриси. Граничний шар сходиться в струмені за межами довжини FRC, забезпечуючи природний дивертор. Топологія FRC співпадає з топологією плазми дзеркал з оберненим полем. Однак суттєва відмінність полягає в тому, що FRC-плазма має  $\beta$  близько 10. Власне слабке внутрішнє магнітне поле забезпечує певну місцеву популяцію частинок, які мають певну кінетичну енергію, тобто частинок з великими ларморівськими радіусами в порівнянні з малим радіусом FRC. Очевидно, що саме ці сильні кінетичні ефекти додають щонайменше частковий внесок в загальну стійкість розроблених в минулому і сучасних FRC, таких, як одержувані в експерименті по зіткненню і об'єднанню.

[0006] У експериментах з типовими FRC, розробленими в минулому, домінували конвективні втрати, при цьому утримання енергії визначалося перенесенням частинок. Частинки дифундують з обмеженого сепаратрисою об'єму головним чином радіально, а потім відбуваються їх аксіальні втрати в граничному шарі. Відповідно, утримання FRC залежить від властивостей областей силових ліній, як замкненого, так і відкритого поля. Час дифузії частинок назовні з об'єму, окресленого сепаратрисою, складає  $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$  ( $a \sim r_s/4$ , где  $r_s$  - центральний

радіус сепаратриси),  $D_{\perp}$  - характеристичний коефіцієнт дифузії, такий як  $D_{\perp} \sim 12,5 \rho_{ie}$ , причому  $\rho_{ie}$  являє собою гірорадіус іонів, оцінюваний в магнітному полі, що прикладається ззовні. В експериментах з FRC, розробленими в минулому, час  $\tau_{II\Pi}$  утримання частинок граничного шару по суті являє собою час осьового пробігу. В сталому стані баланс між радіальними і осьовими втратами частинок дає довжину градієнта щільності у сепаратриси, що складає  $\delta \sim (D_{\perp} \tau_{II\Pi})^{1/2}$ . Часові масштаби утримання частинок в FRC складають  $(\tau_{II\Pi})^{1/2}$  для FRC, розроблених в минулому, які мають суттєву щільність у сепаратриси (див., наприклад, TUSZEWSKI M., "Field Reversed Configurations", Nucl. Fusion, 28, 2033 (1988)).

[0007] Іншим недоліком відомих конструкцій FRC-систем була потреба у використанні зовнішніх мультиполів для контролю нестійкості обертання, таких як жолобкові нестійкості при  $n=2$ . Таким чином, типові квадрупольні поля, що прикладаються ззовні, забезпечували необхідний магнітний відновлювальний тиск для зупинення наростання цих нестійких режимів. Хоч цей метод придатний для контролю стійкості термічної основної плазми, він створює серйозну проблему для FRC з більшою кінетичною енергією або вдосконаленими гібридними FRC, де заселення висококінетичними частинками з орбітами великих радіусів об'єднується зі звичайною термічною плазмою. У цих системах спотворення вісесиметричного магнітного поля через такі мультипольні поля приводить до виключно великих втрат швидких частинок за рахунок беззіштовхувальної стохастичної дифузії, яка є наслідком втрати збереження канонічного кінетичного моменту. Таким чином, нове рішення, яке полягає в тому, щоб забезпечити контроль стійкості без інтенсифікації дифузії будь-яких частинок, є важливим для одержання переваги більш високого технічного потенціалу цих концепцій вдосконалених FRC, не досліджених раніше.

[0008] Тому, в світлі вищевикладеного бажано поліпшити утримання і підвищити стійкість FRC, щоб використовувати FRC, працюючі в сталому стані, як 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 і збагачення, а також активні зони реакторів для синтезу легких ядер з метою вироблення енергії в майбутньому.

#### Розкриття винаходу

[0009] Варіанти здійснення даного винаходу, запропоновані тут, направлені на розробку систем і способів, які полегшують формування і підтримання нових високоефективних конфігурацій з оберненим полем (FRC). Згідно з цією новою парадигмою високоефективної FRC дана система об'єднує множину нових ідей і засобів для різкого поліпшення FRC-утримання частинок, енергії і потоку, а також забезпечення контролю стійкості без негативних побічних ефектів.

[0010] Пропонована тут FRC-система включає в себе центральну місткість для утримання, оточену двома діаметрально протилежними формуючими секціями тета-пінчів з оберненим полем, і дві камери диверторів поза формуючими секціями, причому камери диверторів призначені для контролю щільності нейтральних частинок і забруднення домішками. Магнітна система включає в себе ряд дзеркальних котушок квазіпостійного струму, які знаходяться в осьових положеннях вздовж компонентів FRC-системи, причому дзеркальні котушки квазіпостійного струму знаходяться між будь-яким торцем камери утримання і сусідніми формуючими секціями, і дзеркальні пробки, що містять компактні дзеркальні котушки квазіпостійного струму між кожними з формуючих секцій і диверторів, які створюють додаткові направляючі поля для націлювання поверхонь магнітного потоку до дивертора. Формуючі секції включають в себе модульні імпульсні формуючі системи, які роблять можливим формування FRC на місці, а потім її прискорення і інжекцію (= статичне формування) або формування і прискорення одночасно (= динамічне формування).

[0011] FRC-система включає в себе інжектори пучків нейтральних атомів і інжектор таблеток. У одному варіанті здійснення інжектори пучків нахилені для інжекції нейтральних частинок до середньої площини. Наявність інжекторів пучків, нахилених до середньої площини, при осьових положеннях пучків поблизу середньої площини поліпшує зв'язок "пучок-плазма" навіть тоді, коли FRC-плазма скорочується або іншим чином аксіально стискається під час періоду інжекції. У склад входять ще і системи гетерування, а також осьові плазмові гармати. Передбачені також зміщувальні електроди для електричного зміщення відкритих поверхонь потоку.

[0012] У процесі роботи, глобальні параметри плазми, що включають в себе термічну енергію плазми, загальні кількості частинок, радіус і довжину плазми, а також магнітний потік є

практично постійними без спаду, в той час як пучки нейтральних частинок інjektують в плазму, а таблетки забезпечують поповнення належних частинок.

5 [0013] В альтернативному варіанті здійснення замість інjektора таблеток забезпечений інjektор компактного тороїда (КТ) для забезпечення поповнення належних частинок шляхом інjektції сферомакоподібної плазми.

[0014] Системи, способи, ознаки і переваги винаходу будуть або стануть очевидними для фахівця в галузі техніки після вивчення нижченаведених креслень і докладного опису. Мається на увазі, що цей опис поширюється на всі такі додаткові способи, ознаки і переваги, які знаходяться в рамках обсягу домагань винаходу і підпадають під захист за допомогою 10 прикладеної формули винаходу. Також мається на увазі, що винахід не обмежується вимогою обов'язкової наявності всіх подробиць можливих варіантів здійснення.

Короткий опис креслень

[0015] Прикладені креслення, які включені в дану заявку як її частина, ілюструють переважний на даний час варіант здійснення і нарівні із загальним описом, викладеним вище, і 15 докладним описом переважного варіанта здійснення, що наводиться нижче, служать для пояснення принципів даного винаходу і навчання цим принципам.

[0016] Фіг. 1 ілюструє утримання частинок в пропонованій FRC-системі у вискоефективному режимі FRC, в порівнянні із звичайним режимом FRC і в порівнянні з іншими експериментами із звичайними FRC.

20 [0017] Фіг. 2 ілюструє компоненти пропонованої FRC-системи і магнітної топології FRC, одержуваної в пропонованій FRC-системі.

[0018] Фіг. 3А ілюструє базову схему розташування пропонованої FRC-системи на вигляді зверху, включаючи переважне розташування пучків нейтральних частинок, електродів, плазмових гармат, дзеркальних пробок і інjektора таблеток.

25 [0019] Фіг. 3В ілюструє центральну місткість для утримання на вигляді зверху і показує пучки нейтральних частинок, розташовані по нормалі до головної осі симетрії центральної місткості для утримання.

[0020] Фіг. 3С ілюструє центральну місткість для утримання на вигляді зверху і показує пучки нейтральних частинок, розташовані під кутом, відхиленням від нормалі до головної осі симетрії 30 центральної місткості для утримання, і направлені з можливістю інjektції частинок у напрямку до середньої площини центральної місткості для утримання.

[0021] Фіг. 4 ілюструє схематичне зображення компонентів системи імпульсного живлення для формуючих секцій.

35 [0022] Фіг. 5 ілюструє ізометричне зображення окремого формуючого модуля імпульсного живлення.

[0023] Фіг. 6 ілюструє ізометричне зображення вузла формуючих труб.

[0024] Фіг. 7 ілюструє ізометричне зображення в частковому перерізі системи пучків нейтральних частинок і ключових компонентів.

40 [0025] Фіг. 8 ілюструє ізометричне зображення засобів генерування пучків нейтральних частинок на камері утримання.

[0026] Фіг. 9 ілюструє ізометричне зображення в частковому перерізі переважного розташування систем Ti- і Li-гетерування.

45 [0027] Фіг. 10 ілюструє ізометричне зображення в частковому перерізі плазмової гармати, встановленої в камері дивертора. Також показані відповідна магнітна дзеркальна проба і електродний вузол дивертора.

[0028] Фіг. 11 ілюструє переважну схему розташування кільцевого електрода зміщення на осьовому торці камери утримання.

50 [0029] Фіг. 12 ілюструє еволюцію радіуса виключуваного потоку в FRC-системі, одержаного, виходячи з ряду зовнішніх діаманітних контурів в двох формуючих секціях тета-пінчів з оберненим полем і магнітних зондів, закладених всередині центральної металевої камери утримання. Час вимірюється з моменту синхронізованого обернення поля в джерелах для формування, а відстань z задається відносно осьової середньої площини машини.

55 [00300] Фіг. 13(a)-(d) ілюструють дані, одержані в результаті невідтримуваного розряду в характерному невискоефективному режимі FRC на пропонованій FRC-системі. Як функції часу показані: (a) радіус виключуваного потоку в середній площині; (b) 6 хорд лінійно-інтегральної щільності із інтерферометра, що знаходиться в середній площині, для визначення вмісту CO<sub>2</sub>; (c) радіальні профілі розподілу щільності, інвертовані по Абелю, за даними інтерферометра для визначення вмісту CO<sub>2</sub>; і (d) повна температура плазми, виходячи з балансу тиску.

60 [0031] Фіг. 14 ілюструє осьові профілі виключуваного потоку у вибрані моменти часу для одного і того ж розряду з пропонованої FRC-системи, показаної на Фіг. 13.

[0032] Фіг. 15 ілюструє ізометричне зображення відхиляючих катушок, встановлених зовні камери утримання.

[0033] Фіг. 16 ілюструє кореляції часу життя FRC і тривалість імпульсів інжектіваних пучків нейтральних частинок. Як показано, більш тривалі імпульси пучка дають більший час життя FRC.

[0034] Фіг. 17 ілюструє індивідуальні і сукупні впливи різних компонентів FRC-системи на робочі характеристики FRC і досягнення високоефективного режиму.

[0035] Фіг. 18(a)-(d) ілюструють дані, одержані в результаті непідтримуваного розряду в характерному високоефективному режимі FRC на пропонованій FRC-системі. Як функції часу показані: (a) радіус виключуваного потоку в середній площині; (b) 6 хорд лінійно-інтегральної щільності із інтерферометра, що знаходиться в середній площині, для визначення вмісту CO<sub>2</sub>; (c) радіальні профілі розподілу щільності, інвертовані по Абелю, за даними інтерферометра для визначення вмісту CO<sub>2</sub>; і (d) повна температура плазми, виходячи з рівності тисків.

[0036] Фіг. 19 ілюструють утримання потоку як функцію температури (T<sub>e</sub>) електронів. Це дає графічне представлення про знову встановлюваний режим масштабування, який перевершує відомі, для розрядів у високоефективному режимі FRC.

[0037] Фіг. 20 ілюструє час життя FRC, відповідно до довжини імпульсу непохилих і похилих інжектіваних пучків нейтральних частинок.

[0038] На Фіг. 21A і 21B ілюструється базова схема розташування інжектора компактного тороїда (КТ).

[0039] На Фіг. 22A и 22B ілюструється центральна ємність для утримання і показаний установлений на неї інжектор КТ.

[0040] На Фіг. 23A и 23B ілюструється базова схема розташування відповідно до альтернативного варіанта здійснення інжектора КТ, що має зв'язану з ним пролітну трубку.

[0041] Слід зазначити, що креслення необов'язково виконані в масштабі і елементи аналогічних конструкцій або функцій у загальному випадку позначені однаковими позиціями на всіх кресленнях з метою ілюстрації. Слід також зазначити, що креслення призначені тільки для полегшення опису різних варіантів здійснення, про які тут йде мова. На кресленнях не обов'язково описується кожен аспект запропонованих тут ідей, і креслення не обмежують обсяг домагань відповідно до формули винаходу.

#### Докладний опис

[0041] Потрібно зазначити, що креслення необов'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 йде мова. На кресленнях не обов'язково описується кожний аспект запропонованих тут ідей, і креслення не обмежують обсяг домагань згідно з формулою винаходу.

[0042] Дані варіанти здійснення, запропоновані тут, направлені на розробку систем і способів, які полегшують формування і підтримання високоефективних конфігурацій з оберненим полем (FRC), надаючи їм чудову стійкість, а також чудове утримання частинок, енергії і потоку, в порівнянні із 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.

[0043] 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, описуваної тут. Відповідно до цієї нової парадигми дані системи і способи об'єднують множину нових ідей і засобів для різкого поліпшення утримання 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 FRC-системі 10, описуваній нижче (див. Фіг. 2 і 3), працюючій відповідно до високоефективного режиму FRC при формуванні і підтриманні FRC, в порівнянні з роботою відповідно до звичайного режиму при формуванні і підтриманні FRC і в порівнянні з утриманням частинок відповідно до звичайних режимів формування і підтримання FRC, використовуваних в інших експериментах. У даному розкритті будуть наведені загальний і докладний описи нових окремих компонентів FRC-системи 10 і способів, а також їх сукупні ефекти.

#### Опис FRC-системи

##### Вакуумна система

[0044] Фіг. 2 і 3 показують схематичне зображення пропонованої FRC-системи 10. FRC-система 10 включає в себе центральну місткість 100 для утримання, оточену двома діаметрально протилежними формуючими секціями 200 тета-пінчів з оберненим полем, і поза формуючими секціями 200 дві камери 300 диверторів для контролю щільності нейтральних частинок і забруднення домішками. Пропонована FRC-система 10 була побудована так, що вона пристосована до надвисокого вакууму і працює при типових початкових тисках  $10^{-8}$  торр. Такі вакуумметричні тиски вимагають використовувати стикувальні фланці спареного відкачування між стикованими компонентами, металеві кільцеві ущільнення, високочисті внутрішні стінки, а також ретельне початкове кондиціонування поверхонь всіх деталей перед збиранням, таке як фізичне і хімічне очищення з подальшими вакуумним сушінням протягом 24 годин при  $250^{\circ}\text{C}$  і очищенням тліючим розрядом у водні.

[0045] Формуючі секції 200 тета-пінчів з оберненим полем являють собою стандартні тета-пінчі з оберненим полем (FRTP), хоч і з вдосконаленою формуючою системою імпульсного живлення, яка детально розглядається нижче (див. Фіг. 4-6). Кожна формуюча секція 200 виконана зі стандартних непрозорих кварцових труб промислової якості, що мають таку особливість, як наявність внутрішньої футерівки з надчистого кварцу товщиною 2 міліметри. Камера 100 утримання виконана з нержавіючої сталі, забезпечуючи множину радіальних і тангенціальних отворів; вона також служить як засіб збереження потоку у часових рамках експерименту, описуваного нижче, і обмежує швидкі магнітні перехідні процеси. Вакууми створюються і підтримуються в межах FRC-системи 10 за допомогою набору безмасляних спіральних форвакуумних насосів, турбомолекулярних насосів і кріонасосів.

#### Магнітна система

[0046] На Фіг. 2 і 3 ілюструється магнітна система 400. На Фіг. 2 серед інших конструктивних особливостей ілюструються профілі магнітного потоку і щільності FRC (як функції радіальних і осьових координат), властиві FRC 450, створюваній за допомогою FRC-системи 10. Ці профілі одержуються методом двовимірного числового моделювання за допомогою магнітогідродинамічного (МГД) генератора Холла з використанням коду, розробленого для моделювання систем і способів, відповідних FRC-системі 10, і добре узгоджуються з експериментальними даними вимірювань. Як видно на Фіг. 2, FRC 450 складається з тора силових ліній замкненого поля у внутрішньому просторі 453 FRC 450 в межах сепаратриси 451 і кільцевого граничного шару 456 на лініях 452 відкритого поля зовні від сепаратриси 451. Граничний шар 456 сходиться в струмені 454 за межами довжини FRC, забезпечуючи природний дивертор.

[0047] Головна магнітна система 410 включає в себе ряд котушок 412, 414 і 416 квазіпостійного струму, які знаходяться в осьових положеннях вздовж компонентів FRC-системи 10, тобто вздовж камери 100 утримання, формуючих секцій 200 і диверторів 300. Котушки 412, 414 і 416 квазіпостійного струму заживлені за допомогою імпульсних джерел живлення квазіпостійного струму і створюють базові магнітні поля зміщення з індукцією приблизно 0,1 Тл в камері 100 утримання, формуючих 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 формуючими 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 формуючих 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 направляючі 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 всієї цієї конструкції з котушок полягає в тому, щоб щільно зв'язувати і направляти поверхні 455 магнітного потоку і струмені 454 плазми, що течуть до торця, у віддалені камери 310 диверторів 300. І, нарешті, зовні камери 100 утримання розташований набір "антен" 460 на основі відхиляючих котушок (див. Фіг. 15), причому по дві з кожної сторони середньої площини, які живляться за допомогою джерел живлення постійного струму. Конфігурація антен 460 на основі відхиляючих котушок може бути виконана так, щоб забезпечити 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 відхиляючих котушок можуть гнучко забезпечувати магнітні поля, які є або симетричними, або асиметричними відносно середньої площини машини, залежно від напрямку струмів, що прикладаються.

Формуючі системи імпульсного живлення

5 [0048] Формуючі системи 210 імпульсного живлення працюють за принципом модифікованого тета-пінча. Є дві системи, кожна з яких живить одну з формуючих секцій 200. На Фіг. 4-6 ілюструються головні складові блоки і розташування формуючих систем 210. Система 210 формування 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 формуючих кварцових труб 240. Кожний модуль 10 220 складається з конденсаторів 221, індукторів 223, швидкодіючих сильноточових перемикачів 225 і пов'язаних з ними схем 222 запуску і 224 скидання заряду. Кожна формуюча 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 15 досягається за допомогою відомої системи запуску 222 і керування 224, яка забезпечує синхронізацію між формуючими системами 210 на кожній формуючій секції 200 і мінімізує нестійку синхронізацію перемикачів, обмежуючи її десятками наносекунд. Перевагою цієї модульної конструкції є гнучка робота: FRC може бути формована на місці, а потім прискорена і інжектована (= статичне формування) або сформована і прискорена одночасно (= динамічне 20 формування).

Інжектори пучків нейтральних частинок

[0049] Пучки 600 нейтральних атомів розгортають в FRC-системі 10, 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, 25 розташовані навколо центральної камери 100 утримання і інjektують швидкі частинки в плазму FRC тангенціально (і перпендикулярно або по нормалі до основної осі симетрії центральної місткості 100 для утримання) з деяким параметром прицілювання, так що цільова зона захоплення лежить в межах сепаратриси 451 (див. Фіг. 2). Кожна система 610 і 640 інжекції здатна інjektувати пучки нейтральних частинок потужністю до 1 МВт в плазму FRC з енергіями 30 частинок в діапазоні між 20 і 40 кеВ. Системи 610 і 640 основані на багатодіркових джерелах виділення позитивних іонів і передбачають використання геометричного фокусування, інерційного охолодження іоновиділяючих решіток і диференціального відкачування. Крім використання різних джерел плазми системи 610 і 640 розрізняються головним чином по відповідності їх фізичної конструкції відповідним місцям їх установа, надаючи можливості 35 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 (ВЧ) плазми на вхідному торці (що замінюється дуговим джерелом в системах 40 640) з магнітним екраном 614, що накриває цей торець. З джерелом 612 плазми пов'язаний блок 616, що включає в себе оптичне джерело іонів і прискорювальні сітки, а запірний клапан 620 розташований між блоком 616, що включає в себе оптичне джерело іонів і прискорювальні сітки, і нейтралізатором 622. Відхиляючий магніт 624 і засіб 628 скидання іонів розташовані між нейтралізатором 622 і націлюючим пристроєм 630 на вихідному торці. Система охолодження містить дві криогенні холодильні машини, дві криогенні панелі 634 і кожух 638 з охолодженням 45 рідким азотом. Ця універсальна конструкція забезпечує роботу в широкому діапазоні параметрів FRC.

[0050] Альтернативною конфігурацією для інжекторів 600 пучків нейтральних атомів є конфігурація, яка забезпечує тангенціальну інжекцію швидких частинок в FRC-плазму, але під кутом  $A$  менше  $90^\circ$  відносно головної осі симетрії центральної місткості 100 для утримання. Ці 50 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 місткості 100 для утримання будуть інjektувати 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 55 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 місткості приведе до створення 60 FRC-плазми із збільшеним осьовим подовженням і зниженою температурою, тоді як підбір



"більш перпендикулярного" кута А приведе до плазми, яка коротше в осьовому напрямку, але гарячіше. Таким чином, кут А інжекції і місцеположення інжекторів 615 пучків можуть бути оптимізовані для різних цілей. На доповнення, таке регулювання кута установлення і місцеположення інжекторів 615 пучків може забезпечити пучки 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 у міру зменшення кута інжекції відносно головної осі симетрії згаданої місткості 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 FRC-плазма скорочується або іншим чином стискується в осьовому напрямку протягом періоду інжекції.

#### Інжектор таблеток

[0051] Щоб забезпечити засіб для інжекції нових частинок і кращого контролю загальної кількості частинок в FRC, на FRC-системі 10 використовується 12-стовбуровий інжектор 700 таблеток (див., наприклад, Vinyar I. et al., "Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE and HL-2A", Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 to 10/01 (2010)). Фіг. 3 ілюструє схему розташування інжектора 700 таблеток в FRC-системі 10. Циліндричні таблетки (D~1 мм, L~1-2 мм) інжектуються в FRC зі швидкістю в діапазоні 150-250 км/с. Кожна окрема таблетка містить приблизно  $5 \times 10^{19}$  атомів водню, що порівнянно із загальною кількістю частинок в FRC.

#### Системи гетерування

[0052] Добре відомо, що нейтральний газоподібний галоген є серйозною проблемою у всіх утримуючих системах. Процеси обміну зарядами і рециркуляції (вивільнення холодного матеріалу домішок зі стінки) можуть здійснювати згубний вплив на утримання енергії і частинок. Крім того, будь-яка значна щільність нейтрального газу на границі або біля неї приведе до негайних втрат, які щонайменше значно скорочують час життя інжектованих (високоенергетичних) частинок на орбітах великих радіусів (термін "орбіта великого радіуса" стосується частинок, що мають орбіти в рамках топології FRC або щонайменше радіуси орбіт, які набагато більше, ніж лінійний масштаб градієнта характеристичного магнітного поля), і цей факт є згубним для всіх енергетичних застосувань плазми, включаючи термоядерний синтез, через розігрівання пучка.

[0053] Кондиціонування поверхонь є засобом, за допомогою якого можна боротися із згубними впливами нейтрального газу і домішок або зменшувати ці впливи в утримуючій системі. З цією метою, в пропонованій тут FRC-системі 10 використовуються системи 810 і 822 осадження титану і літію, які покривають повернуті до плазми поверхні камери 100 утримання (або місткості для утримання) і диверторів 300 плівками Ti і/або Li (товщина яких складає десятки мікрометрів). Ці покриття наносяться методами осадження з парової фази. Твердий Li і/або Ti випаровується і/або сублимується і напильюється на сусідні поверхні, утворюючи покриття. Джерелами є ядерні печі з направляючими бандажами 822 (у випадку Li) або нагріті сфери твердої речовини з направляючими бандажами 812 (у випадку Ti). Системи для випаровування Li, як правило, працюють в безперервному режимі, в той час як сублиматори Ti в більшості випадків працюють в перервах між роботою з плазмою. Робочі температури цих систем перевищують 600 °C для одержання великих швидкостей осадження. Щоб досягнути прийняттого покриття стінок, необхідні множинні стратегічно локалізовані системи випаровування і/або сублимації. На Фіг. 9 детально ілюструється переважне розташування систем 810 і 820 гетерування в FRC-системі 10. Покриття діють як гетеруючі поверхні і ефективно відкачують нейтральні атоми і 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

[0054] Як указано вище, в FRC-системі 10 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 утримуючих котушок 412, 414 і 416 головних магнітних системи 410. Перший набір дзеркальних котушок 420 сприяє головним чином керуванню і осьовому розташуванню FRC 450 під час об'єднання і забезпечує контроль надання рівноважної форми під час підтримання. Перший набір 420 дзеркальних котушок створює магнітні поля з номінально більшою індукцією (приблизно 0,4-0,5 Тл), ніж у центрального утримуючого поля, створюваного центральною утримуючою котушкою 412.

Другий набір дзеркальних котушок 430, який включає в себе три компактні дзеркальні котушки 432, 434 і 436 квазіпостійного струму, знаходиться між формуючими 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 звуженням 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 - в порівнянні з плоскою конструкцією, що передбачає висвердлені отвори з плюсовими метричними допусками обмежувальних котушок 412, 414 і 416. Призначення дзеркальних пробок 440 багатозначне. (1) Котушки 432, 434, 436 і 444 щільно зв'язують і направляють поверхні 455 магнітного потоку і струмені 454 плазми, що течуть до торця, у віддалені камери 310 диверторів. Це має на увазі, що випромінювані частинки досягають диверторів 300 належним чином і що є поверхні 455 безперервного потоку, які проходять з області 452 ліній відкритого поля центральної FRC 450 на всьому шляху до диверторів. (2) Фізичні звуження 442 в FRC-системі 10, через які згадані котушки 432, 434, 436 і 444 дають можливість проходити поверхням 452 магнітного потоку і струменям 454 плазми, ускладнюють течію нейтрального газу з плазмових гармат 350, які встановлені в диверторах 300. Подібним же чином, звуження 442 запобігають зворотній течії газу від формуючих секцій 200 до диверторів 300, тим самим зменшуючи кількість нейтральних частинок, які доводиться вводити у всю FRC-систему 10 на початку запуску FRC. (3) Строго осьові дзеркала, утворювані котушками 432, 434, 436 і 444, зменшують осьові втрати частинок і, тим самим, знижують здатність частинок до паралельної дифузії по силових лініях відкритого поля.

25 Осьові плазмові гармати

[0055] Потоки плазми з гармат 350, встановлених в камерах 310 диверторів 300, призначені для поліпшення робочих характеристик стійкості і пучків нейтральних частинок. Гармати 350 встановлені по осі всередині камер 310 диверторів 300, як проілюстровано на Фіг. 3 і 10, і створюють плазму, що тече вздовж відкритих ліній 452 потоку в диверторі 300 і у напрямку до центра камери 100 утримання. Гармати 350 працюють при високощільному газовому розряді в каналі з пакета 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.

[0056] Потоки плазми з гармат можуть пронизувати магнітні поля дзеркальних пробок 440 і текти в формуючу секцію 200 і камеру 100 утримання. Ефективність перенесення плазми через дзеркальні пробки 440 збільшується із зменшенням 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  $10^{22}$  протонів 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.

[0057] Щоб додатково підвищити щільність плазми, можна було б використовувати газосепаратор для відгонки додаткового газу в потік плазми з гармати 350. Цей метод забезпечує збільшення щільності інжектваної плазми в декілька разів. Газосепаратор, встановлений в FRC-системі 10 на повернутій до диверторів 300 стороні дзеркальних пробок 440, поліпшує поповнення граничного шару 456 FRC, формування FRC 450 і лінійне зв'язування плазми.

[0058] 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.

55 Зміщувальні електроди

[0059] Електричне зміщення відкритих поверхонь потоку може забезпечити радіальні потенціали, які приводять до азимутального руху,  $E \times B$ , що забезпечує механізм керування, аналогічний повороту рукоятки, для керування обертанням лінійної плазми відкритого поля, а також фактичною активною зоною 450 FRC за допомогою розриву швидкості. Щоб досягнути цього керування, в FRC-системі 10 застосовуються різні електроди, стратегічно розміщені в

різних частинах машини. Фіг. 3 ілюструє електроди зміщення, розташовані в переважних місцеположеннях в межах FRC-системи 10.

[0060] У принципі, існують 4 класи електродів: (1) точкові електроди 905 в камері 100 утримання, які вступають в контакт з конкретними силовими лініями 452 відкритого поля на границі FRC 450, забезпечуючи локальне зарядження; (2) кільцеві електроди 900 між камерою 100 утримання і формуючими секціями 200, призначені для азимутально-симетричного зарядження віддалених від границі шарів 456 потоку; (3) пакети концентричних електродів 910 в диверторах 300 для зарядження 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 плазмових гармат 350 (які перехоплюють внутрішні відкриті поверхні 455 потоку біля сепаратриси FRC 450). На Фіг. 10 і 11 показані деякі типові конструкції деяких електродів.

[0061] У всіх випадках, ці електроди збуджуються за допомогою імпульсних джерел живлення або джерел живлення постійного струму при напруженнях приблизно до 800 В. Залежно від розмірів електродів і місць, де вони перетинають поверхні потоку, виявляється можливим споживання струмів в кілоамперному діапазоні.

Непідтримувана робота FRC-системи - звичайний режим

[0062] Стандартне формування плазми в FRC-системі 10 додержується добре розробленого методу тета-пінча з оберненим полем. Типовий процес запуску FRC починається збудженням котушок 412, 414, 416, 420, 432, 434 і 436 квазіпостійного струму для роботи в сталому стані. Потім ланцюги імпульсної потужності формуючих систем 210 імпульсного живлення, призначені для створення високочастотної термічної плазми, збуджують котушки 232 збудження імпульсного швидко обертаного магнітного поля, створюючи тимчасове оборотне зміщення приблизно -0,05 Тл в формуючих секціях 200. У цей момент в два формуючі об'єми, обмежені камерами 240 в формі кварцових труб (північною і південною) формуючих секцій 200, інжектують попередньо задану кількість нейтрального газу при 9-20 psi через множинну азимутально орієнтованих продувальних клапанів у фланцях, що знаходяться на зовнішніх торцях формуючих секцій 200. Потім з набору антен на поверхні кварцових труб 240 генерують поле на малих високих частотах (~сотні кілогерц), створюючи попередню іонізацію в формі областей локальної початкової іонізації в межах стовпів нейтрального газу. За цим іде застосування тета-кільцевої модуляції до струму, що збуджує котушки 232 збудження імпульсного швидко обертаного магнітного поля, що приводить до більш загальної попередньої іонізації стовпів газу. На закінчення, заживлюють основні імпульсні джерела живлення формуючих систем 210 імпульсного живлення для збудження котушок 232 збудження імпульсного швидко обертаного магнітного поля, створюючи поле з прямим зміщенням і 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 формуючих трубок 240 (динамічне формування).

[0063] У всьому цьому процесі формування фактичне обертання поля в плазмі відбувається швидко в межах приблизно 5 мкс. Багатогігаватна імпульсна потужність, яка підводиться до плазми, що формується, легко створює гарячі FRC, які потім інжектуються з формуючих 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 формуючих труб 210 (формування осьового градієнта магнітного поля, який повернутий в осьовому напрямку до камери 100 утримання). Обидві формуючі FRC (північна і південна), які сформувалися 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.

[0064] Як тільки північна і південна формуючі FRC опиняються поблизу середньої площини камери 100 утримання, ці FRC зіштовхуються. Осьові кінетичні енергії під час зіткнення північної і південної формуючих 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 складену FRC з радіусами сепаратриси приблизно 0,4 м і осьовою протяжністю приблизно 3 м. Додатковими характеристиками є зовнішні магнітні поля з індуктивністю приблизно 0,1 Тл, щільністю плазми приблизно  $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  і повною температурою плазми до 1 кеВ. Без якого-небудь підтримання, тобто за відсутності нагрівання і/або збудження струму за допомогою інжекції пучків

нейтральних частинок або інших допоміжних засобів, час життя цих FRC, тобто власний час витримування характеристичної конфігурації, обмежується величиною приблизно 1 мс.

Експериментальні дані невідтворюваної роботи - звичайний режим

[0065] На Фіг. 12 показана типова еволюція у часі радіуса  $r_{\Delta\Phi}$  виключуваного потоку, який апроксимує радіус  $r_s$  сепаратриси, для ілюстрації динаміки процесу об'єднання FRC 450, що відбувається в тета-пінчі. Обидва індивідуальні плазмоїди (північний і південний) створюються одночасно, а потім прискорюються, виходячи з відповідних формуючих секцій 200 з надзвуковою швидкістю  $v_z \sim 250$  км/с, і зіштовхуються біля середньої площини при  $z=0$ . Під час зіткнення плазмоїди піддаються осьовому стисненню, за яким іде швидке радіальне і осьове розширення, перш ніж, зрештою, об'єднатися, утворюючи одну FRC 450. Про наявність як радіальної, так і осьової динаміки, свідчать докладні вимірювання профілю щільності і томографія на основі болометра.

[0066] Дані, одержані в результаті невідтворюваного розряду, FRC-системи 10 показані як функції часу на Фіг. 13. FRC ініціюється в момент  $t=0$ . Радіус виключуваного потоку в середній вздовж осі площині машини показаний на Фіг. 13(a). Ці дані одержані з матриці магнітних зондів, які розміщені трохи зсередини виконаної з нержавіючої сталі стінки камери утримання і вимірюють осьове магнітне поле. Стальна стінка є хорошим засобом збереження потоку у часових рамках розряду.

[0067] На Фіг. 13(b) показана лінійно-інтегральна щільність, одержана з працюючого по 6 хордах інтерферометра 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 по Абелю дає профілі розподілу щільності згідно з Фіг. 13(c). Після деякого осьового і радіального коливання протягом першої 0,1 мс, встановлюється FRC з деяким "порожнистим" профілем щільності. Цей профіль є достатньо плоским, з суттєвою щільністю на осі, як вимагають рівноваги в типових плоских FRC.

[0068] На Фіг. 13(d) показана повна температура плазми, яка виведена, виходячи з рівності тисків, і повністю відповідає розсіянню по Томпсону і спектроскопічним вимірюванням.

[0069] Аналіз всього масиву даних виключуваного потоку вказує на те, що форма сепаратриси FRC (наближувана осьовими профілями) поступово еволюціонує від кругової до еліптичної. Ця еволюція, показана на Фіг. 14, узгоджується з поступовим магнітним перезамиканням з переходом від двох FRC до однієї. Дійсно, приблизні оцінки дозволяють передбачити, що в цьому конкретному випадку під час зіткнення перезамикаються приблизно 10 % магнітних потоків двох первинних FRC.

[0070] 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 всередині сепаратриси зменшується швидше, ніж магнітний тиск зовні, натягнення силових ліній магнітного поля в торцевих областях 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,  $7 \times 10^{19}$  частинок і 7 кДж, відповідно) зменшуються, грубо кажучи, на порядок величини за першу мілісекунду, коли виявляється зникнення рівноваги FRC.

Підтримувана робота - високоефективний режим FRC

[0071] На Фіг. 12-14 наведені приклади, що характеризують руйнування FRC без якогось-небудь підтримання. Разом з тим, в FRC-системі 10 застосовуються декілька методів для подальшого поліпшення утримання FRC (внутрішньої активної зони і граничного шару) для досягнення високоефективного режиму FRC і підтримання конфігурації.

Пучки нейтральних частинок

[0072] Спочатку швидкі нейтральні частинки (Н) 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 формуючих FRC в камері 100 утримання в одну FRC 450. Швидкі іони, створювані головним чином за допомогою обміну зарядами, мають бетатронні орбіти (з первинними радіусами в рамках топології FRC або щонайменше значно перевищуючими характеристичний лінійний масштаб градієнта магнітного поля), які сприяють азимутальному струму FRC 450. Після проходження деякої частки розряду (через 0,5-0,8 мс на знімок), достатньо велика популяція швидких іонів значно поліпшує властивості внутрішньої стійкості і утримання FRC (див., наприклад, Binderbauer M. W. and Rostoker N., Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)). Крім того, з перспективи підтримання впливає, що пучки з інжекторів 600 пучків нейтральних частинок також є первинними засобами збудження струму і нагрівають FRC-плазму.

[0073] У режимі плазми FRC-системи 10 швидкі іони уповільнюються насамперед на електронах плазми. Протягом ранньої частини розряду типові усереднені по орбітах часи уповільнення швидких іонів становлять 0,3-0,5 мс, що приводить до значного нагрівання FRC, насамперед електронами. Швидкі іони здійснюють великі радіальні екскурси назовні від сепаратриси, 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 щільність нейтрального газу зовні від сепаратриси була занадто великою. Тому гетерування стінкою і інші методи (такі, як ті, що передбачають використання плазмової гармати 350 і дзеркальних пробок 440, які, крім всього іншого, додають внесок в контроль газу), використовувані в FRC-системі 10, демонструють тенденцію до мінімізації граничних нейтральних частинок і забезпечують необхідне наростання струму, зумовленого швидкими іонами.

Інжекція таблеток

[0074] Коли в межах FRC 450 зростає значна популяція швидких іонів і при цьому температури електронів є підвищеними, а часи життя FRC збільшеними, в FRC 450 інjektують заморожені таблетки H або D з інжектора 700 таблеток, щоб підтримати загальну кількість частинок в 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 за рахунок збільшення площі поверхні інжектованого шматочка шляхом розламування окремої таблетки на менші фрагменти, коли вони знаходяться в стовбурах або інжекційних трубах інжектора 700 таблеток і до того, як вони потрапляють в камеру 100 утримання - етап, який можна реалізувати шляхом збільшення тертя між таблеткою і стінками інжекційної труби за рахунок зменшення радіуса вигину останнього сегмента інжекційної труби безпосередньо перед входом в камеру 100 утримання. Шляхом зміни послідовності і швидкості стрільби з 12 стовбурів (інжекційних трубок), а також фрагментації, можна настроїти систему 700 інжекції таблеток на забезпечення якраз бажаного рівня підтримання загальної кількості частинок. У свою чергу, це сприяє збереженню внутрішнього кінетичного тиску в FRC 450, а також підтримуваної роботи і часу життя FRC 450.

[0075] Як тільки піддані абляції атоми зустрічаються зі значною кількістю плазми в FRC 450, вони стають повністю іонізованими. Потім одержувана в результаті частина холодної плазми нагрівається при зіткненні з власною FRC-плазмою. Енергія, необхідна для збереження бажаної температури FRC, зрештою, підводиться інжекторами 600 пучків. У цьому розумінні, інжектори 700 таблеток разом з інжекторами 600 пучків нейтральних частинок утворюють систему, яка зберігає сталий стан FRC 450 і підтримує її.

Інжектор КТ

[0076] Як альтернативу інжектору таблеток запропонований інжектор компактного тороїда КТ, головним чином, для поповнення плазм у конфігураціях зі повернутим полем (FRC). Інжектор 720 КТ містить плазменну пушку для коаксіальної намагніченої плазми (ППКНП), що, як показано на Фіг. 21 містить у собі коаксіальні циліндричні внутрішній і зовнішній електроди 722 і 724, котушку 726 зсуву, розташовану усередині внутрішнього електрода, і електричний розрив 728 на кінці, протилежному розряду інжектора 720 КТ. Газ інjektується через газоінжектований отвір 730 у простір між внутрішнім і зовнішнім електродами 722 і 724, а сферомачоподібна плазма генерується звідти за допомогою розряду і витісняється з гармати силою Лоренца. Як показано на Фіг. 22А и 22В, пари інжекторів 720 КТ зв'язані з ємністю 100 для утримання біля і з протилежних сторін середньої площини ємності 100 для утримання для інжекції КТ у плазму центральної FRC усередині ємності 100 для утримання. Розрядні кінці інжекторів 720 КТ спрямовані до середньої площини ємності 100 для утримання під деяким кутом до подовжньої осі ємності 100 для утримання аналогічно інжекторам 615 пучків нейтральних частинок.

[0077] В альтернативних варіантах здійснення, як показано на Фіг. 23А і 23В, інжектор 720 КТ містить у собі прольотну трубку 740, яка представляє собою подовжену циліндричну трубку, зв'язану з розрядним кінцем інжектора 720 КТ. Як зображено, прольотна трубка 740 містить у собі котушки 742 прольотної трубки, розташовані навколо трубки і рознесені уздовж її в осьовому напрямку. Уздовж довжини цієї трубки зображена множина діагностичних отворів 744.

[0078] Перевагами інжектора 720 КТ є: (1) керування і регулювання загальної кількості частинок, які приходяться на інжектований КТ; (2) тепла плазма осаджується (замість криогенних таблеток); (3) систему можна експлуатувати в режимі з деякою частотою повторення, щоб забезпечити безупинне поповнення; (4) система також може відновлювати деякий магнітний потік, оскільки інжектований КТ несуть вкладене магнітне поле. В одному варіанті здійснення, призначеному 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, щоб скоротити надходження забруднювальних домішок з електрода 722. Як зображено, усередині внутрішнього електрода 722 установлена котушка 726 зсуву.

5 [0079] В останніх експериментах була досягнута надзвуків швидкість переходу КТ до  $\sim 100$  км/с. Інші типові параметри плазми є наступними: 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, що чинить КТ, забезпечує проникнення інжектваної плазми глибоко в FRC і осадження частинок зсередини від сепаратриси. Останні експерименти показали: поповнення частинок у FRC  
10 привело до того, що  $\sim 10\text{--}20$  % загальної кількості частинок у FRC, забезпечуваних інжекторами КТ, які успішно демонструють поповнення, легко можна переносити без розриву плазми FRC.

Відхиляючі котушки

[0080] Щоб досягнути збудження струму в сталому стані і зберегти необхідний іонний струм, бажано запобігати або значно зменшувати направлені вгору сили електронів, зумовлені силою  
15 тертя між електронами і іонами (що є результатом перенесення кількості руху, виникаючого при зіткненні іонів і електронів). У FRC-системі 10 використовується новий метод забезпечення розриву в розподілі електронів за допомогою статичного магнітного дипольного або квадрупольного поля, що прикладається ззовні. Це досягається за допомогою зовнішніх відхиляючих котушок 460, зображених на Фіг. 15. Радіальне магнітне поле, що поперечно  
20 прикладається з відхиляючих котушок 460, індукує осьове електричне поле у обертовій FRC-плазмі. Результуючий осьовий електронний струм взаємодіє з радіальним магнітним полем, створюючи азимутальну розривну силу  $F_e = -\sigma_e \theta \langle |B_r|^2 \rangle$ , що впливає на електрони. Щоб забезпечити адекватний розрив в розподілі електронів для типових умов в FRC-системі 10, необхідне магнітне дипольне (або квадрупольне) поле, що прикладається, всередині плазми  
25 повинно мати індуктивність лише порядку 0,001 Тл. Відповідне зовнішнє магнітне поле з індуктивністю приблизно 0,015 Тл є достатньо слабким, щоб не викликати відчутні втрати швидких частинок або здійснювати інший негативний вплив на утримання. Фактично, магнітне дипольне (або квадрупольне) поле, що прикладається, додає внесок в пригнічення нестійкості. У поєднанні з тангенціальною інжекцією пучків нейтральних частинок і осьовою інжекцією  
30 плазми, відхиляючі котушки 460 забезпечують додатковий рівень контролю в зв'язку із збереженням струму і стійкістю.

Дзеркальні пробки

[0081] Конструкція імпульсних котушок 444 всередині дзеркальних пробок 440 допускає локальне генерування сильних магнітних полів (2-4 Тл) за допомогою невеликої ємкісної енергії  
35 (приблизно 100 кДж). Для формування магнітних полів, типових при роботі, що розглядається, FRC-системи 10, всі силові лінії поля в межах об'єму формування проходять крізь звуження 442 у дзеркальних пробках 440, як передбачається при наявності силових ліній магнітного поля, показаних на Фіг. 2, і контакт плазми зі стінкою не відбувається. Крім цього, дзеркальні пробки 440 спільно з магнітами 416 диверторів квазіпостійного струму можна відрегулювати так, щоб  
40 направляти силові лінії поля на електроди 910 диверторів, або вирівнювати силові лінії поля в (не показаній) конфігурації гострих торцевих виступів. Остання підвищує стійкість і пригнічує паралельну теплопровідність електронів.

[0082] Самі дзеркальні пробки 440 також додають внесок в контроль нейтрального газу. Дзеркальні пробки 440 забезпечують краще використання газоподібного дейтерію, що  
45 продувається в кварцові труби під час формування FRC, оскільки зворотний потік газу в дивертори 300 значно зменшений завдяки малій здатності пробок пропускати газ (настільки мізерної, як 500 л/с). Більша частина залишкового газу, що продувається, всередині формуючих труб 210 швидко іонізується. Крім того, високощільна плазма, що тече крізь дзеркальні пробки 440, забезпечує ефективну іонізацію нейтральних частинок, а значить і ефективний газовий бар'єр. У результаті, більшість нейтральних частинок, рециркульованих в диверторах 300 з  
50 граничного шару 456 FRC, не повертається в камеру 100 утримання. Крім того, нейтральні частинки, пов'язані з роботою плазмових гармат 350 (що розглядається нижче), будуть в більшою частиною поміщуватися в дивертори 300.

[0083] І, нарешті, дзеркальні пробки 440 схильні поліпшувати утримання граничного шару  
55 FRC. При коефіцієнтах відображення дзеркала (пробка/утримуючі магнітні поля) в діапазоні 20-40 і при довжині 15 м між північною і південною дзеркальними пробками 440 час  $t_1$  утримання частинок граничного шару збільшується на порядок величини. Збільшення  $t_1$  легко поліпшує утримання частинок в FRC.

[0084] Передбачаючи, що обумовлювані радіальною дифузиею (D) втрати частинок з  
60 обмеженого сепаратрисию об'єму 453 балансуються осьовими втратами ( $t_1$ ) з граничного

шару 456, одержуємо  $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (D\pi r_s L_s \delta)(D_s/\tau_{II})$ , звідки випливає, що довжину градієнта щільності у сепаратрисі можна переписати у вигляді  $\delta = (D\tau_{II})^{1/2}$ . Тут  $r_s$ ,  $L_s$  і  $n_s$  - це радіус сепаратрисі, довжина сепаратрисі і щільність у сепаратрисі, відповідно. Час утримання частинок в FRC складає  $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = \langle n \rangle / n_s (\tau_{II})^{1/2}]$ , де  $\tau_{II} = a^2/D$  і при цьому  $a = r_s/4$ . Фізично, збільшення  $\tau_{II}$  веде до збільшеного  $\delta$  (зменшеного градієнта щільності і параметра дрейфу у сепаратрисі), а отже і до зменшених втрат частинок в FRC. Загальне збільшення параметра утримання частинок в FRC звичайно трохи менше, ніж квадратичне, оскільки  $n_s$  збільшується разом з  $\tau_{II}$ .

[0085] Значне збільшення  $\tau_{II}$  також вимагає, щоб граничний шар 456 залишався по великому рахунку стійким (тобто, щоб при  $n=1$  не було жолобкової, рукавної або іншої магнітогідродинамічної нестійкості, типової для відкритих систем). Використання плазмових гармат 350 забезпечує переважну стійкість на границі. У цьому розумінні, дзеркальні пробки 440 і плазмові гармати 350 утворюють ефективну систему контролю границі.

Плазмові гармати

[0086] Плазмові гармати 350 підвищують стійкість струменів 454, що випромінюються з FRC, за допомогою лінійного зв'язування. Плазми, випромінювані з плазмових гармат 350, утворюються без залучення кількості азимутального кутового руху, що показало себе корисним при контролі нестійкості обертання в FRC. Якщо так, то гармати 350 є ефективним засобом контролю стійкості FRC без необхідності застарілого методу квадрупольної стабілізації. У результаті плазмові гармати 350 дають можливість одержання переваги вигідних ефектів швидких частинок або доступу до режиму вдосконаленої гібридної кінетичної FRC, як підкреслюється в цьому розкритті. Отже, плазмові гармати 350 дозволяють експлуатувати FRC-систему 10 при струмах відхиляючих котушок, які придатні якраз для розриву в розподілі електронів, але є меншими, ніж ті, які викликали б нестійкість FRC і/або приводили б до інтенсивної дифузії швидких частинок.

[0087] Як згадувалося в розглянутому вище розділі "Дзеркальні пробки", якби можна було значно збільшити  $\tau_{II}$ , то плазма, що подається з гармат, була б порівнянною зі швидкістю ( $\sim 10^{22}/c$ ) втрат частинок в граничному шарі. Час життя одержуваної з гармат плазми в FRC-системі 10 знаходиться в мілісекундному діапазоні. Дійсно, розглянемо плазму з гармат, що має щільність  $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  і температуру іонів приблизно 200 еВ, поміщену 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 складає  $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ см}$ , а, оскільки  $\lambda_{ii} \ln R/R < L$ , іони знаходяться в газодинамічному режимі. Час утримання плазми в цьому режимі складає  $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ мс}$ , де  $V_s$  - швидкість іонного звуку. Для порівняння, класичний час утримання іонів для цих параметрів плазми складав би  $\tau_c \sim 0,5 \tau_{ii} (\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7 \text{ мс}$ . В принципі, аномальна поперечна дифузія може скоротити час утримання плазми. Разом з тим, якщо передбачити, що в FRC-системі 10 має місце бомівська дифузія, то оцінений час поперечного утримання для плазми з гармат складає  $\tau_{II} > \tau_{gd} \sim 2 \text{ мс}$ . Отже, гармати могли б забезпечити значне поповнення граничного шару 456 FRC і поліпшене загальне утримання частинок в FRC.

[0088] Крім цього, потоки плазми з гармат можна вмикати приблизно на 150-200 мікросекунд, що дозволяє використовувати їх при запуску, поступальному переміщенні і об'єднанні FRC з потраплянням в камеру 100 утримання. Якщо вмикання відбувається приблизно в момент  $t \sim 0$  (ініціація основних джерел живлення FRC), то плазми з гармат сприяють підтриманню FRC 450, одержаної тепер після динамічного формування і об'єднання. Об'єднані загальні кількості частинок з формуючих FRC і з гармат є задовільними для захоплення пучків нейтральних частинок, нагрівання плазми і тривалого підтримання. Якщо вмикання відбувається в момент  $t$  в діапазоні -1-0 мс, то плазми з гармат можуть привести до заповнення кварцових труб 210 плазмою або до іонізації газу, що продувається в кварцові труби, тим самим допускаючи формування FRC при зменшеному або взагалі нульовому об'ємі газу, що продувається. Остання умова може вимагати достатньо холодної формуючої плазми, щоб забезпечити швидку дифузію магнітного поля із зворотним зміщенням. Якщо вмикання відбувається в момент  $t < -2 \text{ мс}$ , то потоки плазми можуть заповнити приблизно 1-3 м<sup>3</sup> лінійного об'єму поля областей формування і утримання формуючих секцій 200 і камеру 100 утримання з цільовою щільністю в декілька одиниць на  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , достатньою для забезпечення створення пучків нейтральних частинок до надходження в FRC. Після цього, формуючі FRC могли б сформуватися і поступально переміщатися в результуючу плазму місткості для утримання. Таким чином, плазмові гармати 350 забезпечують велику різноманітність робочих умов і режимів настроювання параметрів.

Електричне зміщення

[0089] Контроль радіального профілю електричного поля в граничному шарі 456 різними способами вигідний для стійкості FRC і утримання в ній. За допомогою нових, забезпечуючих зміщення компонентів, розгорнутих в FRC-системі 10, можна прикладати множину попередньо підготовлених розподілів електричних потенціалів до групи відкритих поверхонь потоку по всій машині з областей далеко зовні від центральної області утримання в камері 100 утримання. Таким чином, можна генерувати радіальні електричні поля через граничний шар 456 в безпосередній близькості до FRC 450. Потім ці радіальні електричні поля модифікують азимутальне обертання граничного шару 456 і здійснюють його утримання за допомогою розриву швидкості,  $E \times V$ . Будь-яке диференціальне обертання між граничним шаром 456 і активною зоною 453 FRC можна потім передати всередину плазми FRC за рахунок розриву. У результаті контроль граничного шару 456 здійснює безпосередній вплив на активну зону 453 FRC. Крім того, оскільки вільна енергія при обертанні плазми також може бути причиною нестійкості, цей метод забезпечує прямий засіб боротьби із зародженням і зростанням нестійкості. Придатне граничне зміщення в FRC-системі 10 забезпечує ефективний контроль перенесення і обертання силових ліній відкритого поля, а також обертання активної зони FRC. Місцезнаходження і форма різних передбачуваних електродів 900, 905, 910 і 920 забезпечують контроль різних груп поверхонь 455 потоку, а також контроль при різних і незалежних потенціалах. Таким чином, можна реалізувати широкий спектр різних конфігурацій електричних полів і напруженостей, кожного разу з відмінним характеристичним впливом на робочі параметри плазми.

[0090] Ключова перевага всіх цих нових методів зміщення полягає в тому, що на поведінку плазми в активній зоні і на границі можна вплинути з місць, що знаходяться далеко зовні від FRC-плазми, тобто немає необхідності введення яких-небудь фізичних компонентів в контакт з центральною гарячою плазмою (що мало б серйозні наслідки для втрат енергії, потоку і частинок). Це надає основоположний вигідний вплив на робочі характеристики і всі потенційні застосування ідеї високоефективного режиму FRC.

Експериментальні дані - робота у високоефективному режимі FRC

[0091] Інжекція швидких частинок за допомогою пучків з гармат 600, що випромінюють пучки нейтральних частинок, грає важливу роль в забезпеченні високоефективного режиму FRC. Фіг. 16 ілюструє 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, охоплених цим дослідженням. Дані усереднюються по багатьох знімках і тому відображають типову поведінку. Абсолютно очевидно, що збільшена тривалість пучків дає "існуючі довше" FRC. 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 півдороги через розряд) з FRC-плазми 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 в місці, що знаходиться ближче до середньої площини місткості 100, може привести до тенденції зменшення цих втрат і продовження часу життя FRC.

[0092] Фіг. 17 ілюструє впливи різних компонентів на досягнення високоефективного режиму FRC. Тут показане сімейство типових кривих, що відображають час життя FRC 450 як функцію часу. У всіх випадках передбачається постійна, невелика по величині потужність пучків (приблизно 2,5 МВт), що інжектуються протягом всієї тривалості кожного розряду. Кожна крива є характерною для відмінної комбінації компонентів. Наприклад, робота FRC-системи 10 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 нестійкості і поліпшує утримання. Використання сукупності дзеркальних пробок 440 і плазмової гармати 350 додатково зменшує нестійкість і збільшує час життя FRC. І, нарешті, введення гетерування (Ті в цьому випадку) додатково до гармати 350 і пробок 440 дає найкращі результати - в одержуваній FRC немає нестійкості і вона демонструє найбільш тривалий час життя. З цієї експериментальної демонстрації ясно, що вся сукупність компонентів дає найкращий ефект і забезпечує пучки з найкращими розрахунковими умовами.

[0093] Як показано на Фіг. 1, новий виявлений високоефективний режим FRC демонструє різко поліпшену поведінку при перенесенні. Фіг. 1 ілюструє зміну часу утримання частинок в FRC-системі при переході із звичайного режиму у високоефективний режим FRC. Як можна



побачити, згаданий час у високоефективному режимі FRC збільшився більше ніж в 5 разів. Крім того, Фіг. 1 конкретизує час утримання частинок в FRC-системі 10 відносно часу утримання частинок в експериментах з відомими FRC. Що стосується цих інших машин, то високоефективний режим FRC у FRC-системі 10 має утримання, коефіцієнт збільшення якого знаходиться між 5 і значенням, близьким до 20. Нарешті - і це важливіше усього - природа масштабної інваріантності утримання для FRC-системі 10 у високоефективному режимі FRC різко відрізняється від всіх відомих вимірювань. Перед встановленням високоефективного режиму FRC в FRC-системі 10, виводили різні емпіричні закони масштабування з даних, щоб спрогнозувати часи утримання в експериментах з відомими FRC. Всі ці правила залежать головним чином від відношення  $R^2/\rho_i$ , де  $R$  - радіус нуля магнітного поля (нестрога міра фізичного масштабу машини), а  $\rho_i$  - ларморовський радіус іона, оцінюваний в полі, що прикладається ззовні (нестрога міра магнітного поля, що прикладається). З Фіг. 1 ясно, що тривале утримання в звичайній FRC можливе лише при великих габаритах машини і/або сильному магнітному полі. Робота FRC-системі 10 в звичайному режимі FRC відображає тенденцію додержання звичайних правил, як вказана на Фіг. 1. Разом з тим високоефективний режим FRC значно перевершує згаданий режим і показує, що набагато краще утримання досягне і без великих габаритів машини або сильних магнітних полів. З Фіг. 1 також ясно: важливіше те, що високоефективний режим FRC в порівнянні із 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 FRC-системі 10 також збільшилися в 3-8 разів. Отже, великим досягненням високоефективного режиму FRC є можливість використання невеликої потужності пучків, менш сильних магнітних полів і менших габаритів для підтримання і збереження рівноваги FRC в FRC-системі 10 і майбутніх більш потужних машинах. Цим удосконаленням супутні менші витрати на експлуатацію і спорудження, а також знижена технічна складність.

[0094] Для подальшого порівняння, дані характерного розряду у високоефективному режимі FRC в FRC-системі 10 показані на Фіг. 18 як функція часу. На Фіг. 18(a) зображений радіус виключуваного потоку в середній площині. Для цих розсунутих часових рамок провідна стальна стінка більше не є хорошим засобом збереження потоку, а магнітні зонди зсередини від стінки доповнені зондами зовні від стінки для належного врахування магнітної дифузії потоку крізь сталь. У порівнянні з типовими робочими параметрами в звичайному режимі, показаними на Фіг. 13, режим роботи, відповідний високоефективному режиму FRC, демонструє час життя, збільшений більше ніж на 400 %.

[0095] На Фіг. 18(b) показаний характерний графік сліду лінійно-інтегральної щільності з його інвертованим по Абелю доповненням, а на Фіг. 18(c) - профілі щільності. У порівнянні із звичайним режимом FRC, показаним на Фіг. 13, плазма є більш статичною протягом всього імпульсу, що свідчить про дуже стійку роботу. Пікова щільність на знімках високоефективного режиму FRC також трохи нижче, що є наслідком більшої (з коефіцієнтом збільшення до 2) повної температури плазми, як показано на Фіг. 18(d).

[0096] Для відповідного розряду, проілюстрованого на Фіг. 18, 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 дуже придатним для підтримання пучків нейтральних частинок.

[0097] На Фіг. 19 всі переваги високоефективного режиму FRC підсумовані в формі знову встановлюваної масштабної інваріантності експериментального утримання потоку у високоефективному режимі FRC. Як можна 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 ( $i$ , аналогічно, утримання частинок і утримання енергії), грубо кажучи, залежать від квадрата температури електронів ( $T_e$ ) для заданого радіуса ( $r_s$ ) сепаратриси. Це строге масштабування позитивною потужністю згідно з  $T_e$  (а не негативною потужністю) повністю протилежне тому, яке демонструється звичайними токамаками, де утримання, як правило, зворотно пропорційне деякій потужності згідно з температурою електронів. Вияв цієї масштабної інваріантності є прямим наслідком стану високоефективного режиму FRC і популяції іонів на орбітах великих радіусів (тобто орбітах в масштабі топології FRC і/або щонайменше лінійному масштабі градієнта характеристичного магнітного поля). По великому рахунку, ця нова масштабна інваріантність суттєво сприяє високим робочим температурам і дозволяє одержати реактори відносно невеликих розмірів.

[0098] При наявності переваг, які дає високоефективний режим FRC, досягне підтримання або статичний стан FRC, збуджуваний пучками нейтральних частинок, який може бути

підтриманий за допомогою інжекції належних таблеток, а це означає, що глобальні параметри плазми, такі як термічна енергія плазми, радіус і довжина плазми, а також магнітний потік, підтримуються на обґрунтованих рівнях без суттєвого спаду. Для порівняння, на Фіг. 20 показані дані на графіку А, одержані в результаті розряду в характерному високоефективному режимі FRC на FRC-системі 10, як функція часу, і на графіку В для спроектованого характерного високоефективного режиму FRC на FRC-системі 10 як функція часу, при цьому FRC 450 підтримується без спаду протягом всьому імпульсу пучка нейтральних частинок. Для одержання графіка А пучки нейтральних частинок з сумарною потужністю в діапазоні приблизно 2,5-2,9 МВт інжектували в FRC 460 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.

[0099] Як відмічалось вище в зв'язку з Фіг. 16, 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 півдороги через розряд) з FRC-плазми 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 відмічалось 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 FRC-плазма скорочується або іншим чином стискається в осьовому напрямку протягом періоду інжекції. Крім того, належне підживлення таблетками дозволить підтримати необхідну щільність плазми.

[0100] На графіку В представлений результат етапів моделювання, проведених з використанням тривалості активних імпульсів пучків приблизно 6 мс і загальної потужності пучків з гармат 600, які стріляють пучками нейтральних частинок, що декілька 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 з 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°. Пучки потрібно направляти в азимутальному напрямку так, щоб струми були паралельними. Рівнодіюча бічних сил, а також рівнодіюча осьових сил, виникаючих в результаті пучків нейтральних частинок з деякою кількістю руху, будуть мінімізуватися. Як і при одержанні графіка А, швидкі (Н) нейтральні частинки інжектуються з інжекторів 600 пучків нейтральних частинок з моменту, коли північна і південна формуючі FRC зливаються в камері 100 утримання в одну FRC 450.

[0101] Етапи моделювання, що послужили основою для побудови графіка В, передбачали використання багатовимірних алгоритмів рішення за допомогою магнітогідродинамічного (МГД) генератора Хола для одержання 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.

[0102] Як показано за допомогою графіка В, термін служби діаманетиків в сталому стані FRC 450 буде дорівнювати тривалості імпульсу пучка. Разом з тим, 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 спостережуваному при розрядах, які не стимулюються пучками, - ймовірно, після закінчення порядку 1 мс після моменту відключення, - і просто відображає характеристичний час утримання плазми, збуджуваної процесами власних втрат.

[0103] Хоч винахід допускає різні модифікації і альтернативні форми, лише конкретні його приклади показані на кресленнях і детально описані вище. Разом з тим, потрібно зрозуміти, що винахід не обмежується розкритими конкретними формами або способами; навпаки, винахід потрібно вважати охоплюючим всі модифікації, еквіваленти і альтернативи, що знаходяться в рамках суті і обсягу домагань прикладеної формули винаходу.

[0104] У вищевикладеному описі, конкретна сукупність ознак наводиться лише з метою пояснення, що забезпечує повне розуміння даного винаходу. Разом з тим, фахівець в даній галузі техніки зрозуміє, що ці конкретні подробиці не є обов'язковими для втілення даного винаходу на практиці.

[0105] Різні ознаки з характерних прикладів і залежних пунктів формули винаходу можна об'єднувати способами, що не перераховуються конкретно і в явному вигляді, з метою забезпечення додаткових корисних варіантів здійснення принципів даного винаходу. Також явно видно, що всі діапазони значень або указання груп об'єктів розкривають кожне можливе проміжне значення або кожний проміжний об'єкт з метою звичайного опису, а також з метою обмеження заявлюваного об'єкта винаходу.

[0106] Запропоновані системи і способи генерування і підтримання FRC, працюючих у високоефективному режимі FRC. Зрозуміло, що варіанти здійснення, описані тут, наведені з метою пояснення і не повинні вважатися такими, що обмежують об'єкт винаходу. Для фахівця в галузі техніки будуть очевидні різні модифікації, застосування, заміни, комбінації, удосконалення, способи одержання, що знаходяться в рамках обсягу домагань або суті даного винаходу. Наприклад, читач повинен зрозуміти, що конкретний порядок і сукупність технологічних операцій, описані тут, є лише ілюстративними, якщо не вказане інше, а винахід можна здійснити з використанням відмінних або додаткових технологічних операцій або іншої сукупності або порядку технологічних операцій. Як ще один приклад, зазначимо, що кожному ознаку одного варіанта здійснення можна об'єднувати і узгоджувати з іншими ознаками, наведеними в інших варіантах здійснення. При бажанні, можна також передбачити наявність ознак і процесів, відомих звичайним фахівцям. Крім цього, очевидно, що - при бажанні - ознаки можна вносити або виключати. Відповідно, винахід не обмежується нічим, крім того, що викладено в прикладеній формулі винаходу і її еквівалентах.

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Спосіб генерування і підтримання магнітного поля за допомогою конфігурації з оберненим полем (FRC), який включає в себе етапи:

формування FRC навколо плазми в камері утримання і

підтримання FRC на або приблизно на постійному значенні без спаду шляхом інжекції пучків швидких нейтральних атомів з інжекторів пучків нейтральних частинок в FRC-плазму під кутом до середньої площини камери утримання й інжектування плазм компактних тороїдів (КТ) з першого і другого інжекторів КТ в FRC-плазму під кутом до середньої площини камери утримання, причому перший і другий інжектори КТ розташовані діаметрально протилежно, на протилежних сторонах від середньої площини камери утримання.

2. Спосіб за п. 1, який додатково включає в себе етап генерування магнітного поля всередині згаданої камери за допомогою котушок квазіпостійного струму, що простягаються навколо цієї камери.

3. Спосіб за п. 1 або 2, який додатково включає в себе етап генерування дзеркального магнітного поля в межах протилежних торців згаданої камери за допомогою дзеркальних котушок квазіпостійного струму, що простягаються навколо протилежних торців цієї камери.

4. Спосіб за п. 1 або 2, причому етап формування FRC включає в себе формування формуючої FRC в формуючій секції, зв'язаній з торцем камери утримання, і прискорення формуючої FRC до середньої площини згаданої камери для формування FRC.

5. Спосіб за п. 4, причому етап формування FRC включає в себе формування другої формуючої FRC у другій формуючій секції, зв'язаній з другим торцем камери утримання, і прискорення другої формуючої FRC до середньої площини згаданої камери, де дві формуючі FRC зливаються для формування FRC.

6. Спосіб за п. 4, причому етап формування FRC включає в себе одне з формування формуючої FRC з одночасним прискоренням формуючої FRC до середньої площини згаданої камери і формування формуючої FRC з подальшим прискоренням формуючої FRC до середньої площини цієї камери.

7. Спосіб за п. 5, який додатково включає в себе етап направлення поверхонь магнітного потоку FRC в дивертори, зв'язані з торцями формуючих секцій.

8. Спосіб за п. 4, який додатково включає в себе етап направлення поверхонь магнітного потоку FRC в дивертор, зв'язаний з торцем формуючої секції.

9. Спосіб за п. 8, який додатково включає в себе етап направлення поверхонь магнітного потоку FRC у другий дивертор, зв'язаний з торцем згаданої камери навпроти дивертора, зв'язаного з торцем формуючої секції.

10. Спосіб за п. 7, який додатково включає в себе етап генерування магнітного поля в межах формуючих секцій і диверторів за допомогою котушок квазіпостійного струму, що простягаються навколо формуючих секцій і диверторів.

11. Спосіб за п. 7, який додатково включає в себе етап генерування дзеркального магнітного поля між формуючими секціями і диверторами за допомогою дзеркальних котушок квазіпостійного струму.
- 5 12. Спосіб за п. 11, який додатково включає в себе етап генерування магнітного поля дзеркальних пробок в межах звуження між формуючими секціями і диверторами за допомогою дзеркальних пробкових котушок квазіпостійного струму, що простягаються навколо звуження між формуючими секціями і диверторами.
- 10 13. Спосіб за п. 1 або 2, додатково включає в себе етап генерування одного з дипольного магнітного поля і квадрупольного магнітного поля всередині згаданої камери за допомогою відхиляючих котушок, зв'язаних з цієї камерою.
14. Спосіб за п. 1 або 2, який додатково включає в себе етап кондиціонування внутрішніх поверхонь згаданої камери, формуючих секцій і диверторів за допомогою пристрою гетерування.
- 15 15. Спосіб за п. 14, причому пристрій гетерування включає в себе один з пристрою осадження титану і пристрою осадження літію.
16. Спосіб за п. 1 або 2, який додатково включає в себе етап осьової інжекції плазми в FRC з встановлених в осьовому напрямку плазмових гармат.
17. Спосіб за п. 1 або 2, який додатково включає в себе етап контролю радіального профілю електричного поля в граничному шарі FRC.
- 20 18. Спосіб за п. 17, причому етап контролю радіального профілю електричного поля в граничному шарі FRC включає в себе накладення розподілу електричного потенціалу на групу відкритих поверхонь потоку FRC за допомогою відхиляючих електродів.
19. Спосіб за п. 1, причому інжектування плазм КТ в FRC-плазму під кутом до середньої площини камери утримання включає в себе інжектування плазм КТ під кутом, відхиленням від нормалі до подовжньої осі камери утримання на приблизно від  $15^\circ$  до  $25^\circ$ , і в напрямку до середньої площини камери утримання.
- 25 20. Спосіб за п. 1, причому інжектування плазм КТ в FRC-плазму під кутом до середньої площини камери утримання включає в себе інжектування плазм КТ в режимі з деякою частотою повторення.
- 30 21. Система для генерування і підтримання магнітного поля за допомогою конфігурації з оберненим полем (FRC), яка містить камеру утримання, першу і другу діаметрально протилежні формуючі FRC секції, зв'язані з камерою утримання, причому формуюча секція містить модульні формуючі пристрої для генерування FRC і поступального переміщення FRC до середньої площини камери утримання,
- 35 перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою формуючими секціями, першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами, першою і другою формуючими секціями і камерою утримання,
- 40 множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з камерою утримання і орієнтованих з можливістю інжекції пучків нейтральних атомів до середньої площини камери утримання під кутом, відхиленням від нормалі до подовжньої осі камери утримання,
- магнітний пристрій, який містить множину котушок квазіпостійного струму, розташованих навколо камери утримання, першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів, перший і другий набори дзеркальних котушок квазіпостійного струму, розташовані між камерою
- 45 утримання і першою і другою формуючими секціями, і перші і другі дзеркальні пробки, розташовані між першою і другою формуючими секціями і першим і другим диверторами, пристрій гетерування, зв'язаний з камерою утримання і першим і другим диверторами, один або більше зміщувальних електродів для електричного зміщення відкритої поверхні потоку генерованої FRC, причому згадані один або більше зміщувальних електродів розташовані
- 50 всередині одного або більше з камери утримання, першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів,
- дві або більше відхиляючих котушок, зв'язаних з камерою утримання, і перший і другий інжектори КТ, зв'язані з камерою утримання під кутом, спрямованим до середньої площини камери утримання, причому перший і другий інжектори КТ розташовані
- 55 діаметрально протилежно, на протилежних сторонах від середньої площини камери утримання.
22. Система за п. 21, яка виконана із можливістю генерування FRC і підтримання FRC на або приблизно на постійному значенні без спаду, в той час як пучки нейтральних атомів інжектуються в FRC.

23. Система за п. 21, причому дзеркальна пробка містить третій і четвертий набори дзеркальних катушок між кожними з першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів.
- 5 24. Система за п. 21 або 22, причому дзеркальна пробка додатково містить набір дзеркальних пробкових катушок, обвитих навколо звуження в каналі між кожними з першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів.
25. Система за будь-яким з пп. 21-24, причому подовжена труба кожної з формуючих секцій являє собою кварцову трубу з кварцовою футерівкою.
- 10 26. Система за будь-яким з пп. 21-25, причому формуючі пристрої є формуючими пристроями імпульсного живлення.
27. Система за будь-яким з пп. 21-26, причому формуючі пристрої містять множину блоків живлення і керування, зв'язаних з окремими вузлами з множини вузлів підвіски, для збудження набору катушок окремих вузлів зі згаданої множини вузлів підвіски, обвитих навколо подовженої труби кожної з першої і другої формуючих секцій.
- 15 28. Система за п. 27, причому окремі блоки зі згаданої множини блоків живлення і керування містять пристрій запуску і керування.
29. Система за п. 28, причому пристрої запуску і керування окремих блоків зі згаданої множини блоків живлення і керування виконані з можливістю синхронізації для забезпечення статичного формування FRC, при якому FRC формується, а потім інжектуються, або динамічного формування FRC, при якому FRC одночасно формується і поступально переміщується.
- 20 30. Система за будь-яким з пп. 21-29, причому згадана множина інжекторів пучків нейтральних атомів містить один або більше інжекторів пучків нейтральних атомів з джерелами ВЧ-плазми і один або більше інжекторів пучків нейтральних атомів з дуговими джерелами.
- 25 31. Система за будь-яким з пп. 21-30, причому згадана множина інжекторів пучків нейтральних атомів орієнтована так, що тракти інжекції направлені тангенціально до FRC з цільовою зоною захоплення в межах сепаратриси FRC.
32. Система за будь-яким з пп. 21-31, причому пристрій гетерування містить один або більше з пристрою осадження титану і пристрою осадження літію, які покривають повернуті до плазми поверхні камери утримання і першого і другого диверторів.
- 30 33. Система за будь-яким з пп. 21-32, причому зміщувальні електроди включають в себе один або більше з одного або більше точкових електродів, розташованих всередині камери утримання для контакту з силовими лініями відкритого поля, набору кільцевих електродів між камерою утримання і першою і другою формуючими секціями для азимутально-симетричного заряджання віддалених від границі шарів потоку, множини концентричних поміщених в пакет електродів, розташованих в першому і другому диверторах для заряджання множинних концентричних шарів потоку, а також анодів плазмових гармат для перехоплення відкритого потоку.
- 35 34. Система для генерування і підтримання магнітного поля за допомогою конфігурації з оберненим полем (FRC), яка містить
- 40 камеру утримання,
- першу і другу діаметрально протилежні формуючі FRC секції, зв'язані з камерою утримання, перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою формуючими секціями,
- одне або більше з множини плазмових гармат, одного або більше зміщувальних електродів і першої і другої дзеркальних пробок, причому згадана множина плазмових гармат включає в
- 45 себе першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами, першою і другою формуючими секціями і камерою утримання, при цьому згадані один або більше зміщувальних електродів розташовані всередині одного або більше з камери утримання, першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів, і при цьому перша і друга дзеркальні пробки розташовані між першою і другою формуючими секціями і першим і
- 50 другим диверторами,
- пристрій гетерування, зв'язаний з камерою утримання і першим і другим диверторами, множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з камерою утримання і орієнтованих перпендикулярно осі камери утримання, і
- магнітний пристрій, який містить множину катушок квазіпостійного струму, розташованих навколо камери утримання, першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів, перший і другий набори дзеркальних катушок квазіпостійного струму, розташовані між камерою утримання і першою і другою формуючими секціями, і
- 55 перший і другий інжектори КТ, зв'язані з камерою утримання під кутом, спрямованим до середньої площини камери утримання, причому перший і другий інжектори КТ розташовані
- 60 діаметрально протилежно, на протилежних сторонах від середньої площини камери утримання,

при цьому система виконана із можливістю генерування FRC і підтримання FRC без спаду, в той час як пучки нейтральних частинок інжектуються в плазму.

35. Система за п. 34, яка виконана з можливістю генерування FRC і підтримання FRC на або приблизно на постійному значенні без спаду, в той час як пучки нейтральних атомів інжектуються в FRC.

36. Система за п. 34 або 35, причому дзеркальна пробка містить третій і четвертий набори дзеркальних котушок між кожними з першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів.

37. Система за п. 34 або 35, причому дзеркальна пробка додатково містить набір дзеркальних пробкових котушок, обвитих навколо звуження в каналі між кожними з першої і другої формуючих секцій і першого і другого диверторів.

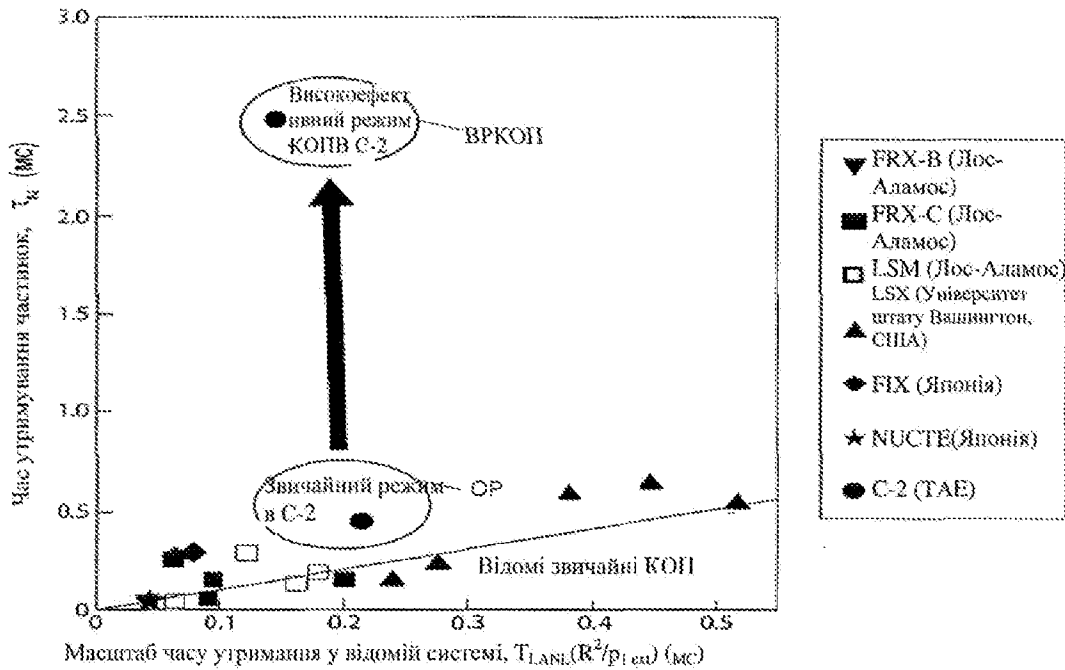
38. Система за п. 34 або 35, яка додатково містить дві або більше відхиляючих котушок, зв'язаних з камерою утримання.

39. Система за п. 34 або 35, причому формуюча секція містить модульні формуючі пристрої для генерування FRC і її поступального переміщення до середньої площини камери утримання.

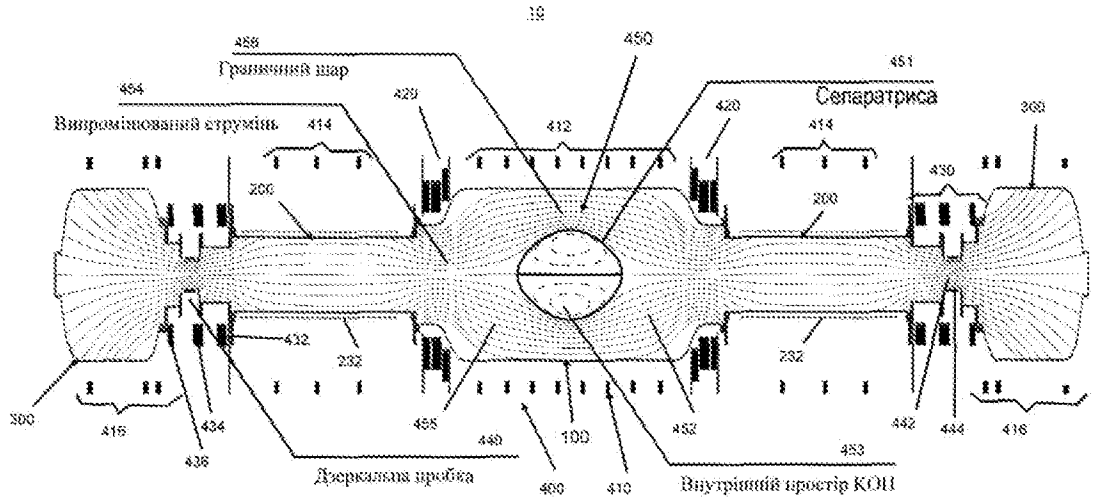
40. Система за п. 34 або 35, причому зміщувальні електроди включають в себе один або більше з одного або більше точкових електродів, розташованих всередині камери утримання для контакту з силовими лініями відкритого поля, набору кільцевих електродів між камерою утримання і першою і другою формуючими секціями для азимутально-симетричного заряджання віддалених від границі шарів потоку, множини концентричних поміщених в пакет електродів, розташованих в першому і другому диверторах для заряджання множинних концентричних шарів потоку, а також анодів плазмових гармат для перехоплення відкритого потоку.

41. Система за пп. 21 або 34, причому перший і другий інжектори КТ орієнтовані під кутом, відхиленим від нормалі до подовжньої осі камери утримання на приблизно від 15° до 25°, і в напрямку до середньої площини камери утримання.

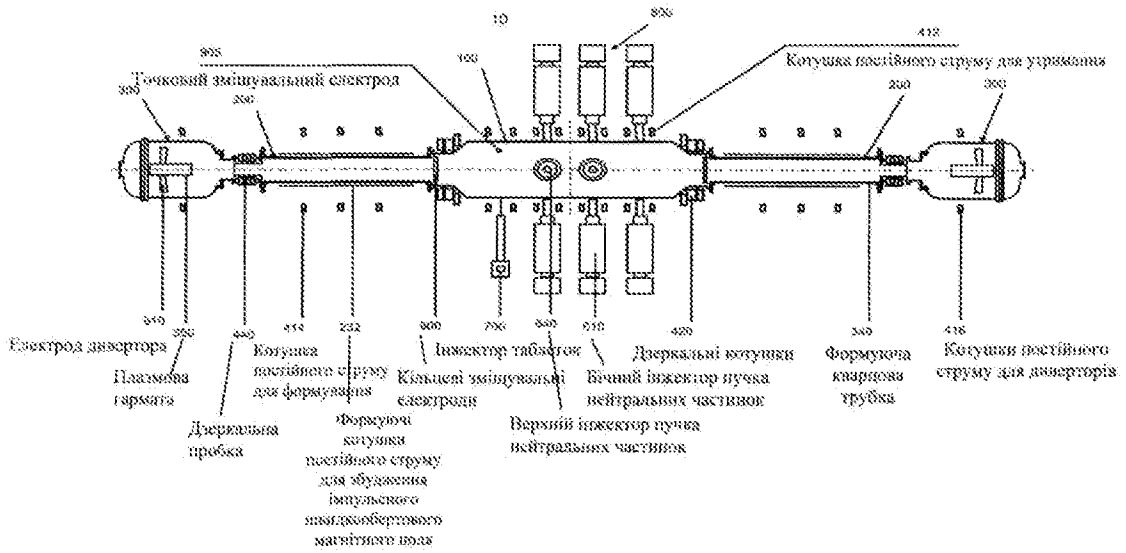
42. Система за пп. 21 або 34, причому перший і другий інжектори КТ виконані з можливістю інжектування плазм КТ в FRC-плазму в режимі з деякою частотою повторення.



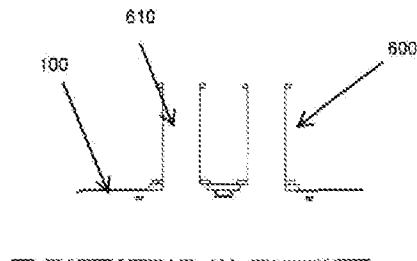
Фіг. 1



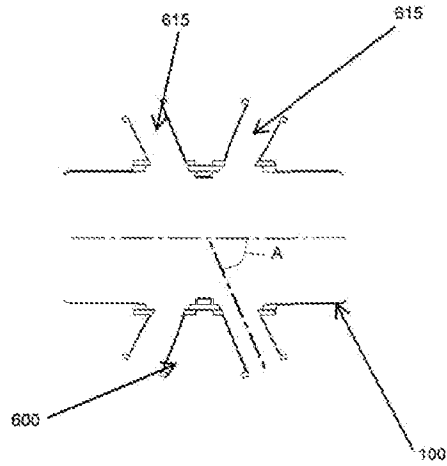
Фіг. 2



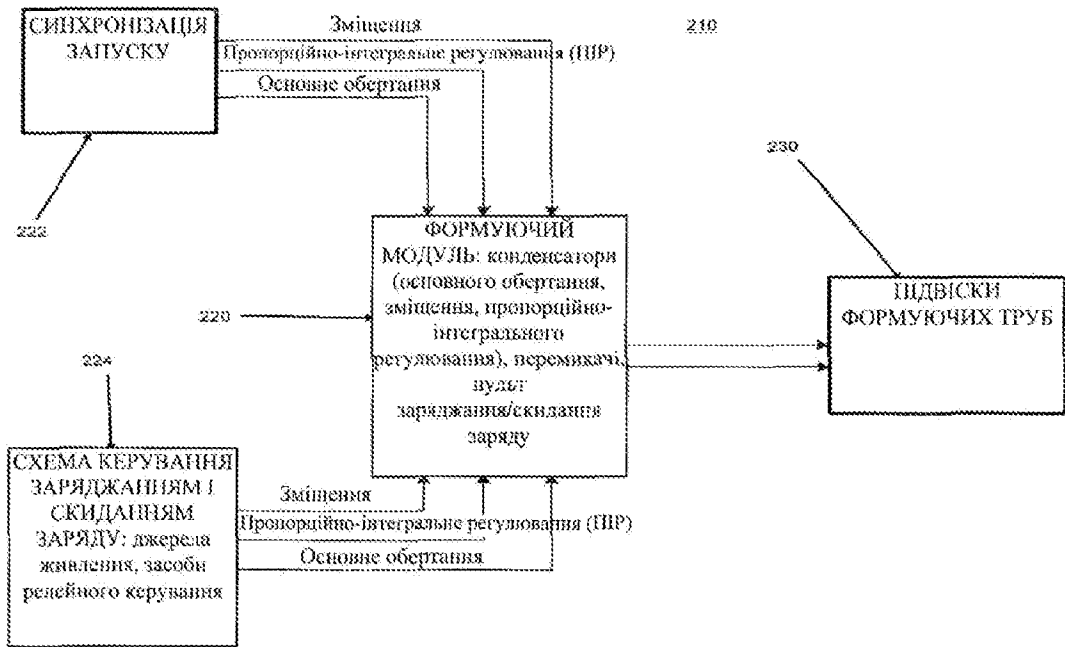
Фіг. 3А



Фіг. 3В

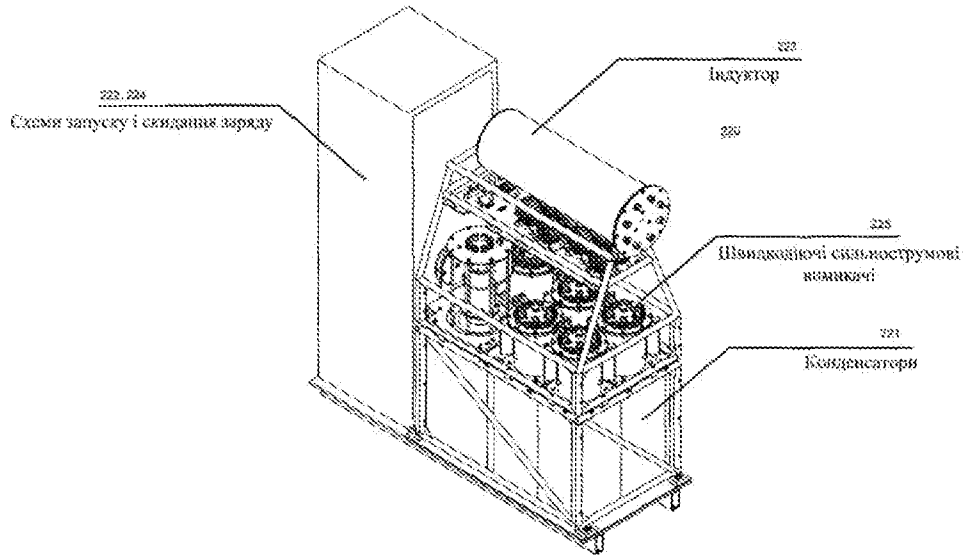


Фіг. 3С

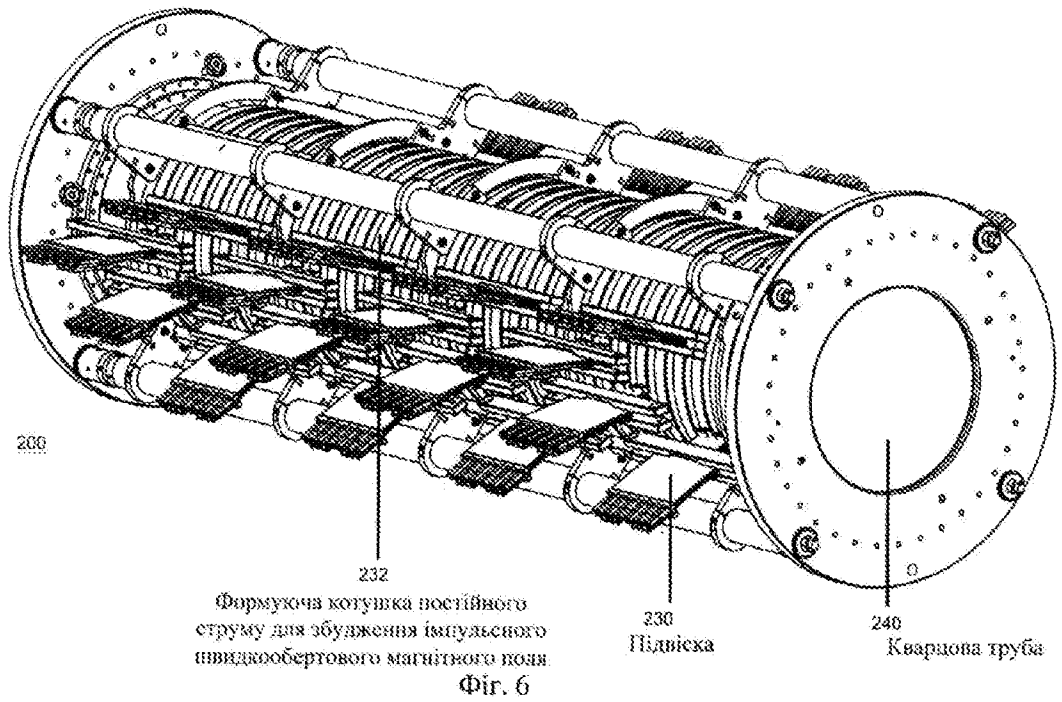


Фіг. 4

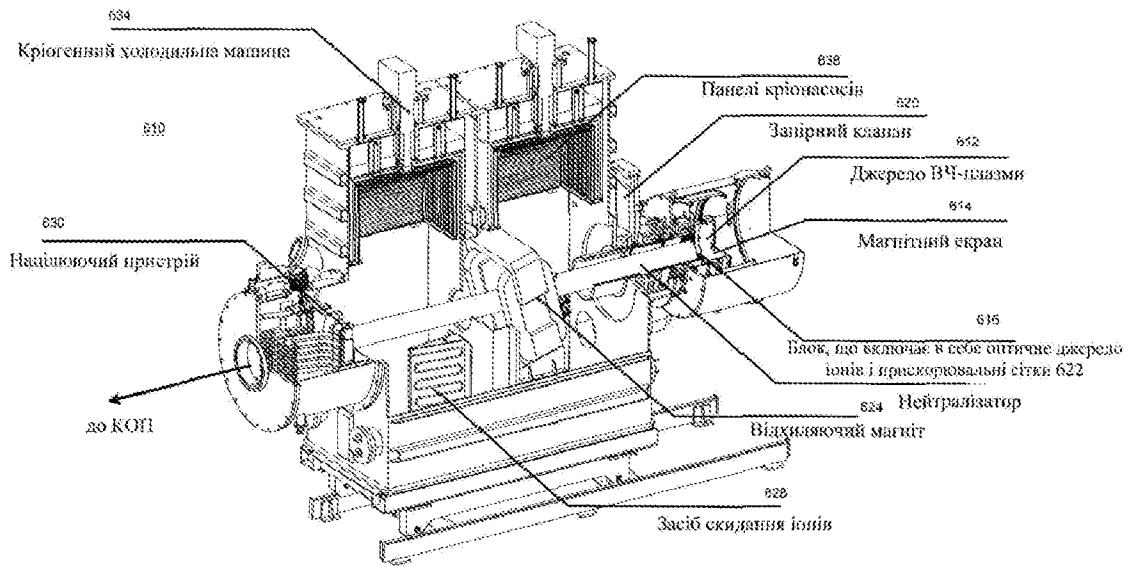




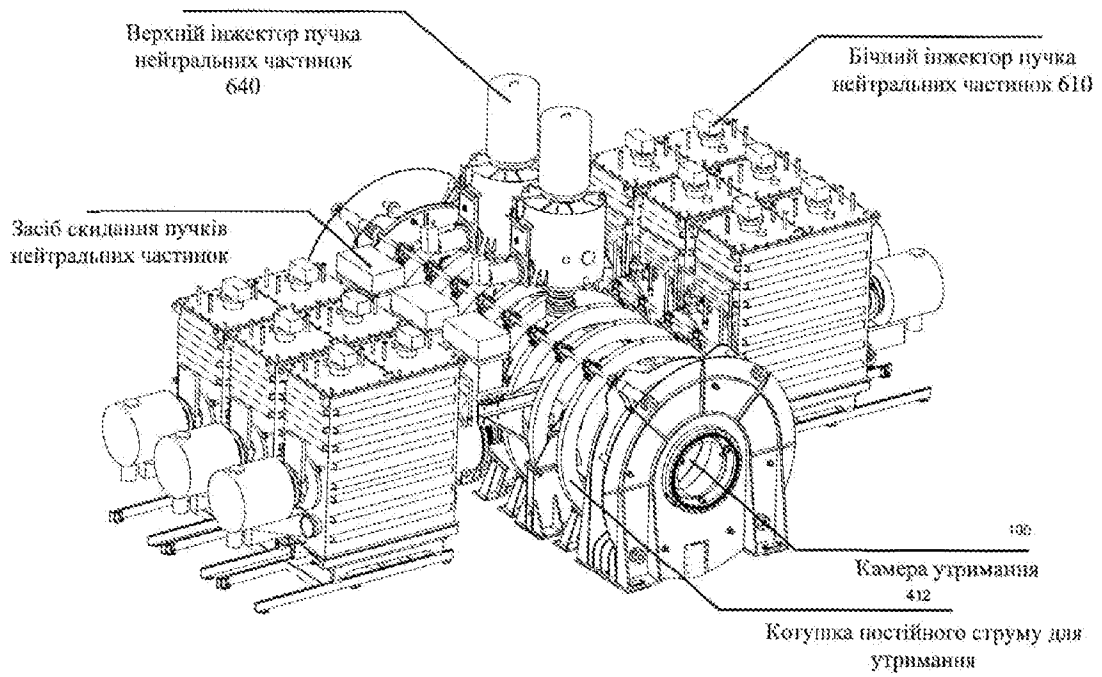
Фіг. 5



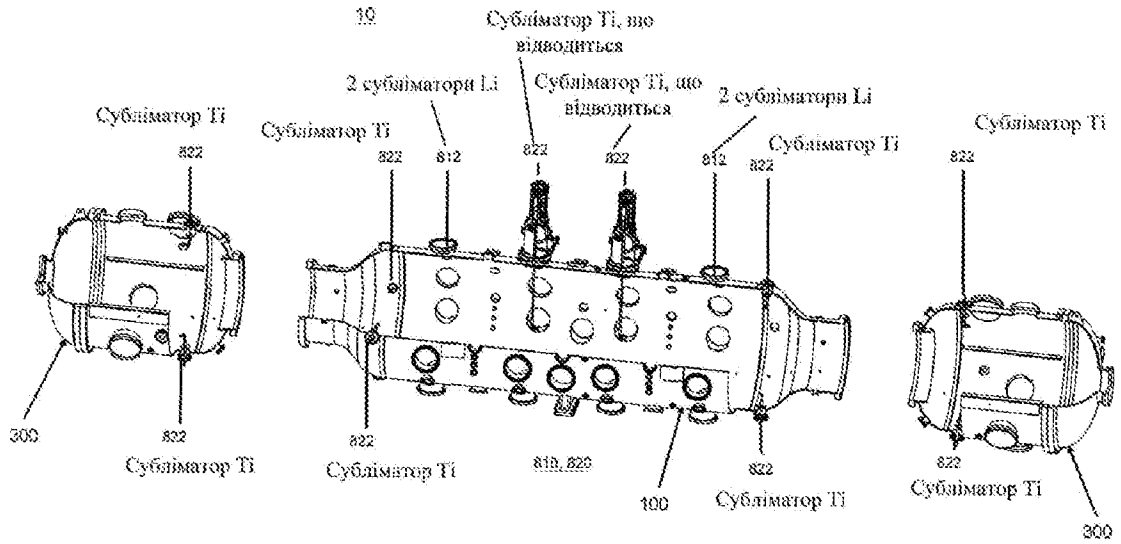
Фіг. 6



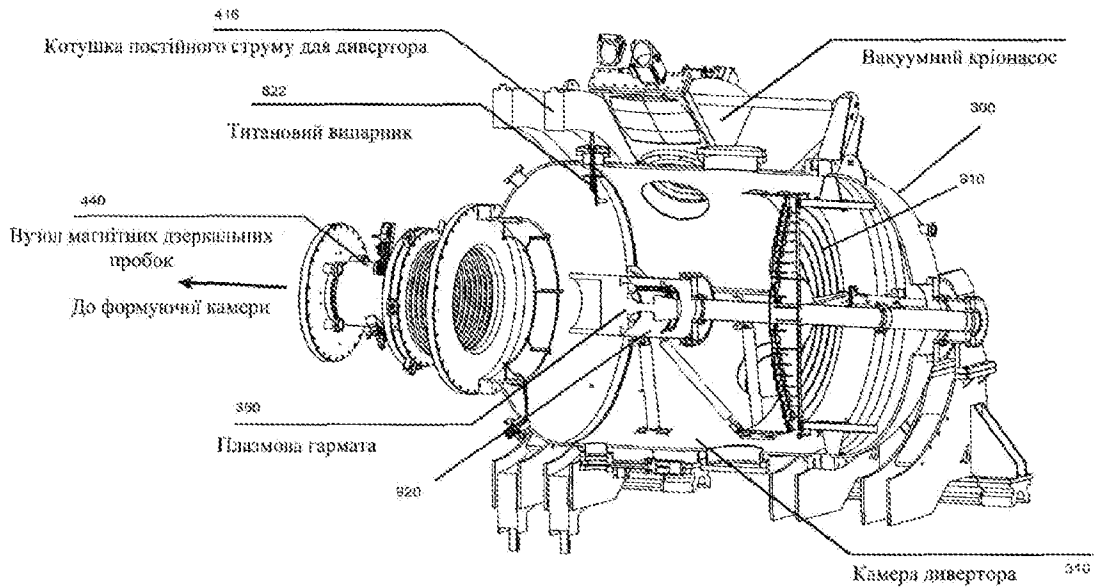
Фіг. 7



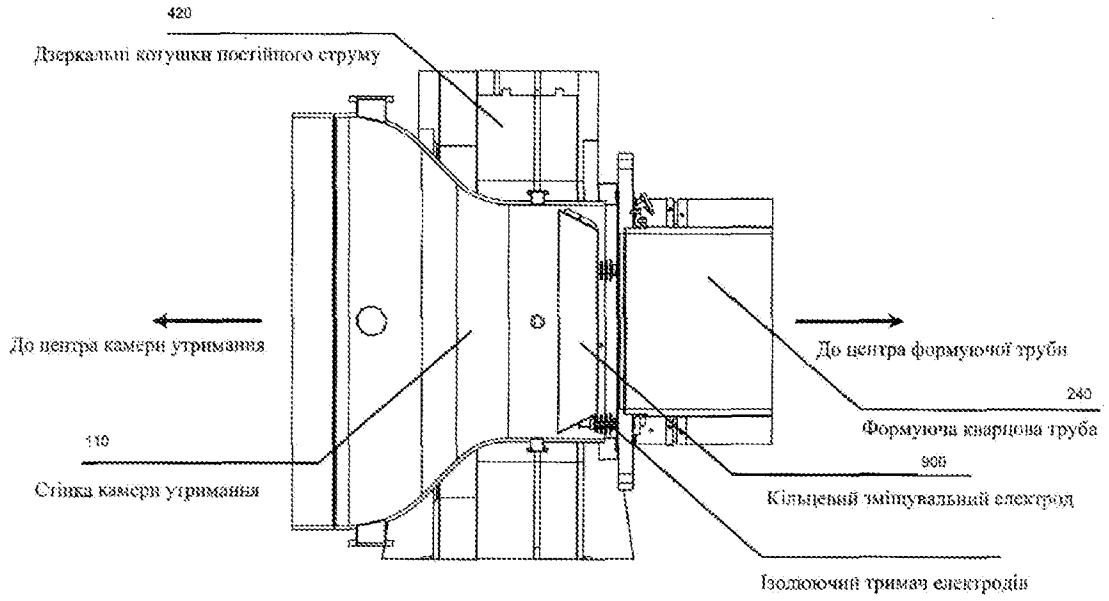
Фіг. 8



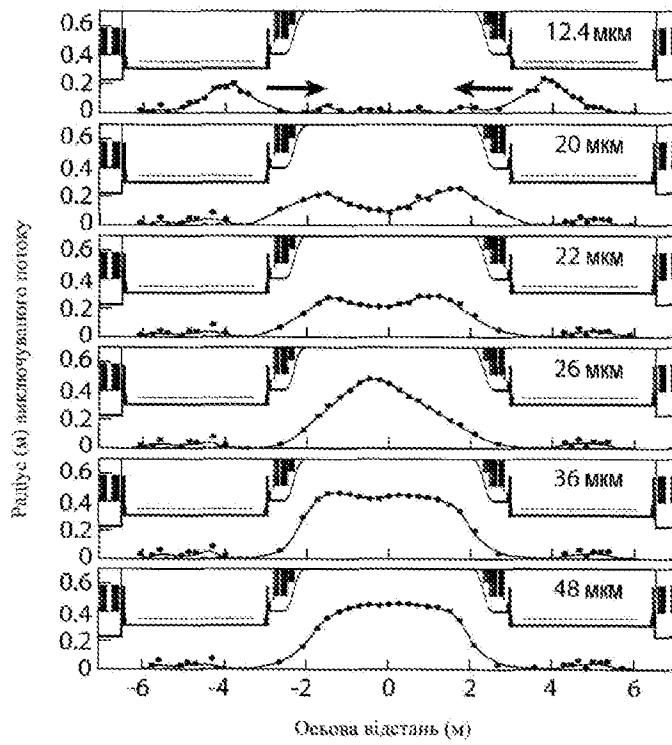
Фіг. 9



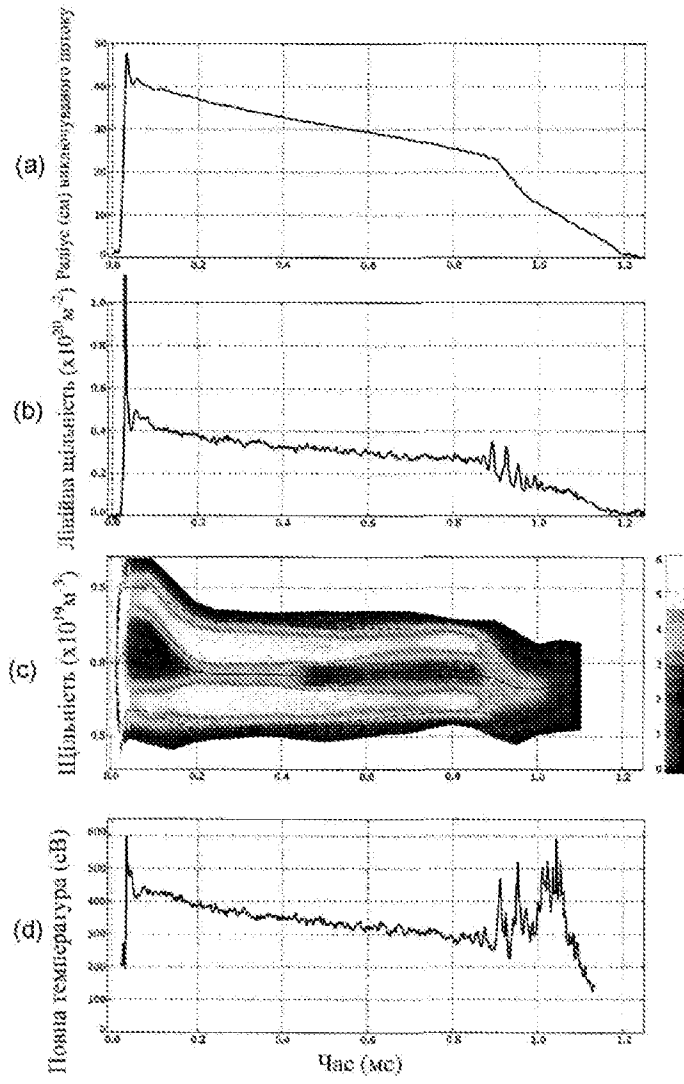
Фіг. 10



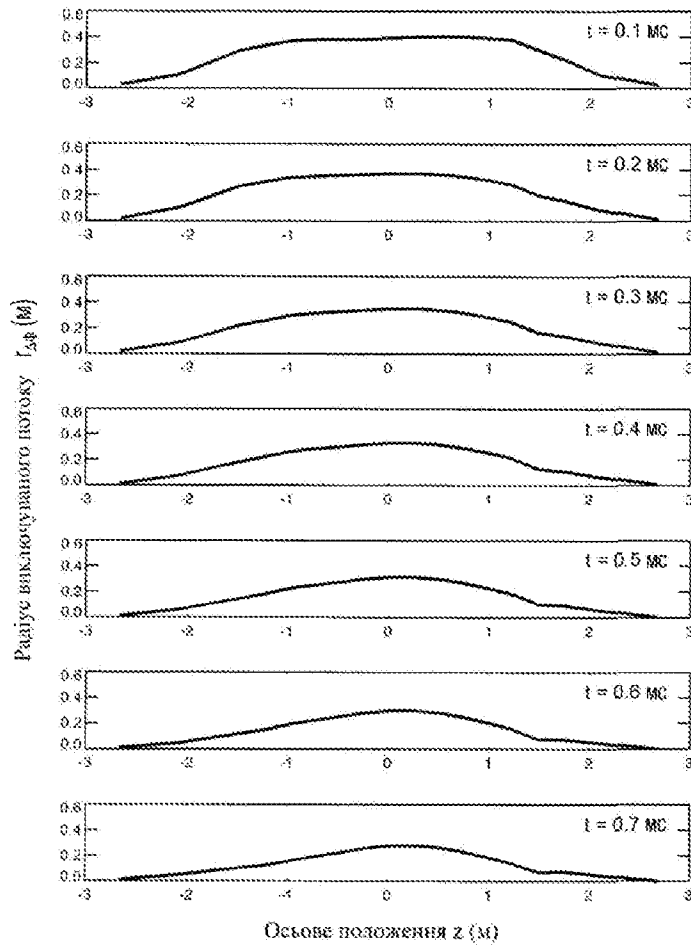
Фіг. 11



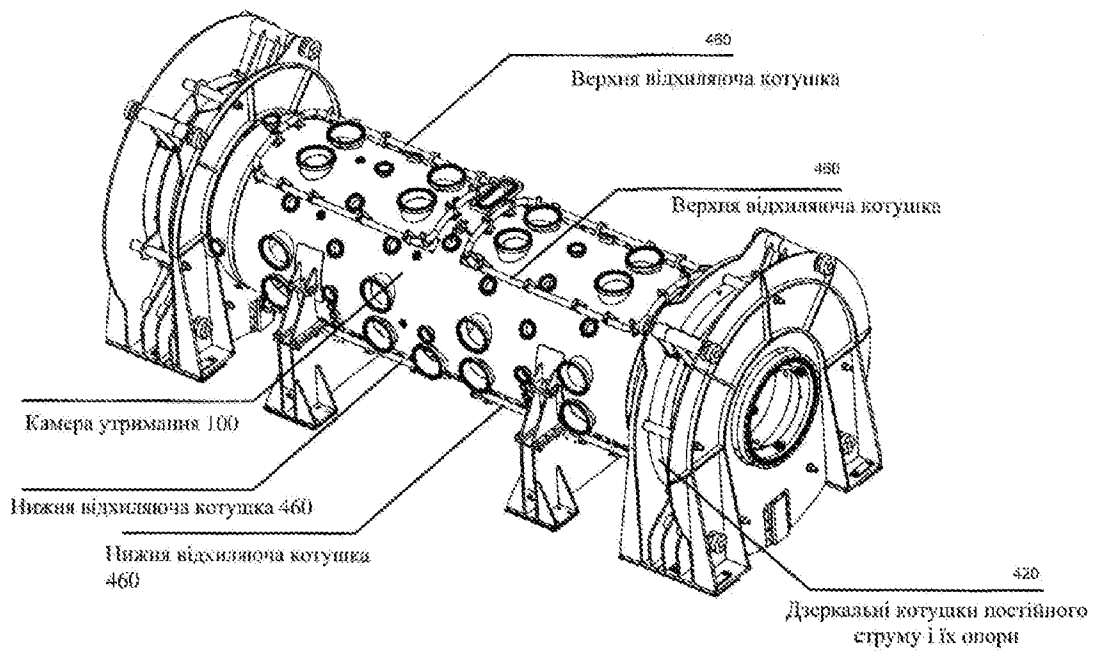
Фіг. 12



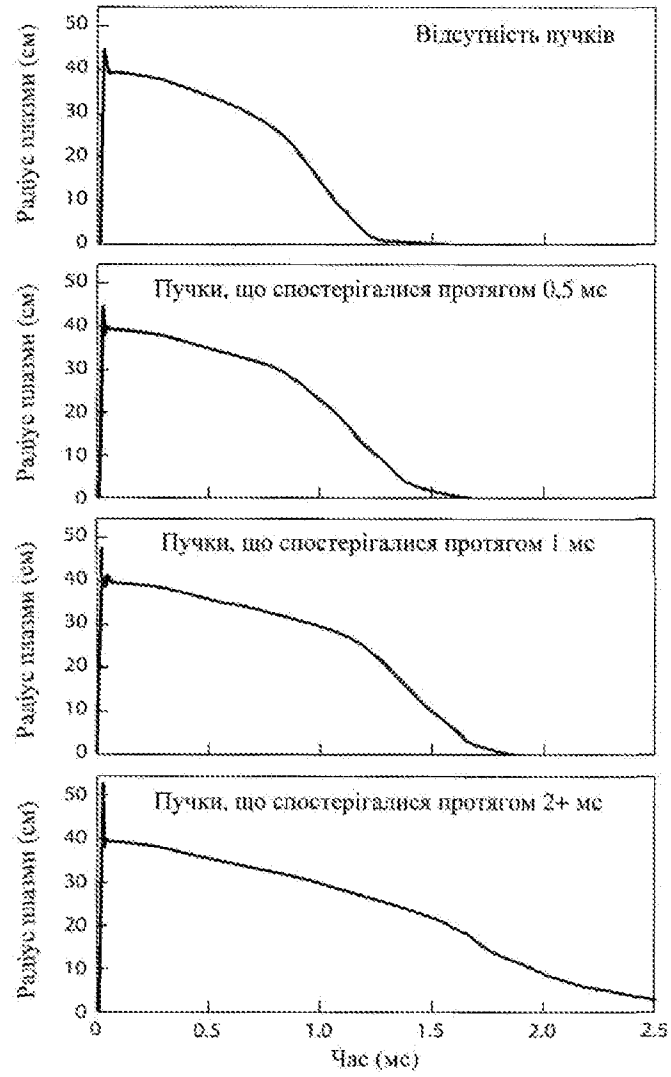
Фіг. 13



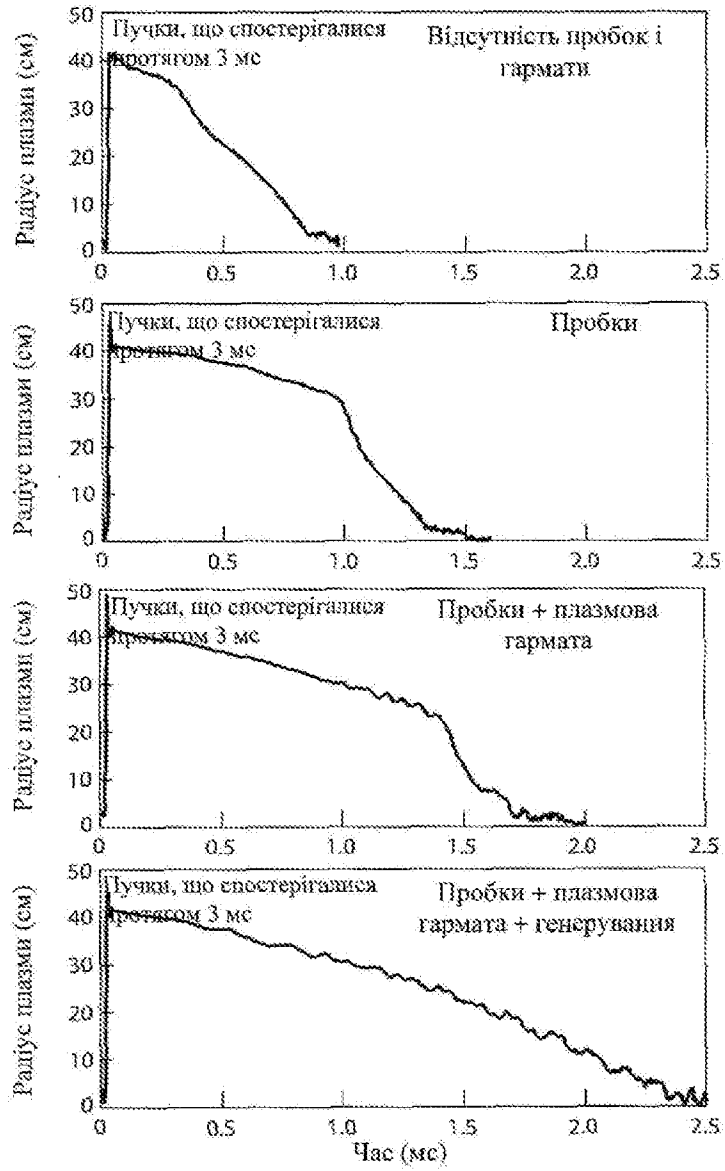
Фіг. 14



Фіг. 15

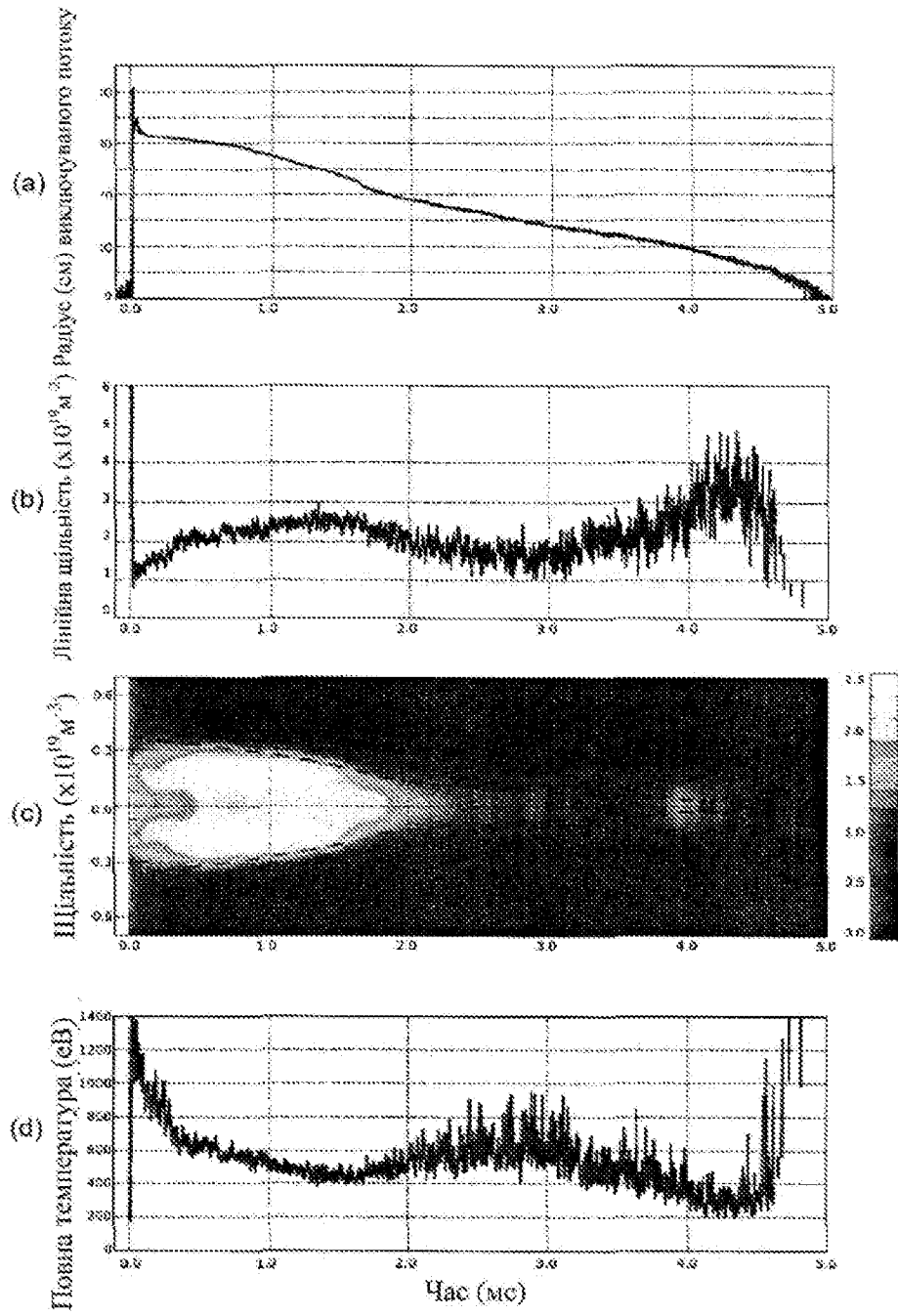


Фіг. 16

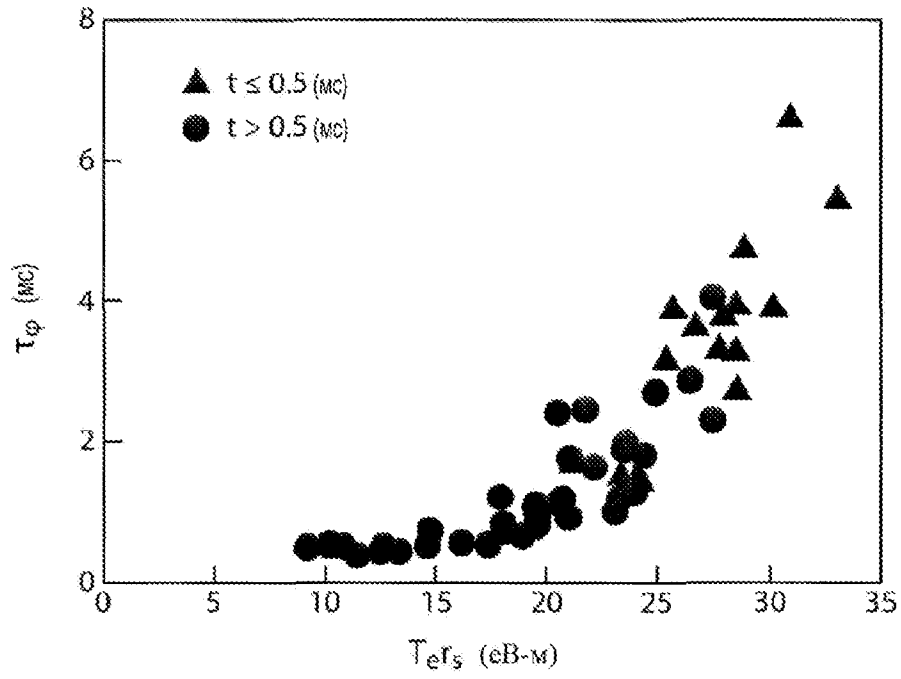


Фіг. 17

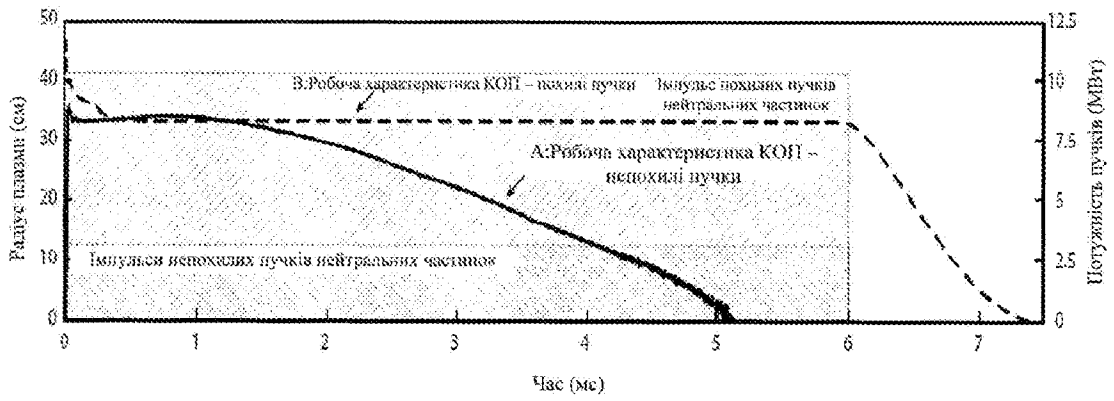




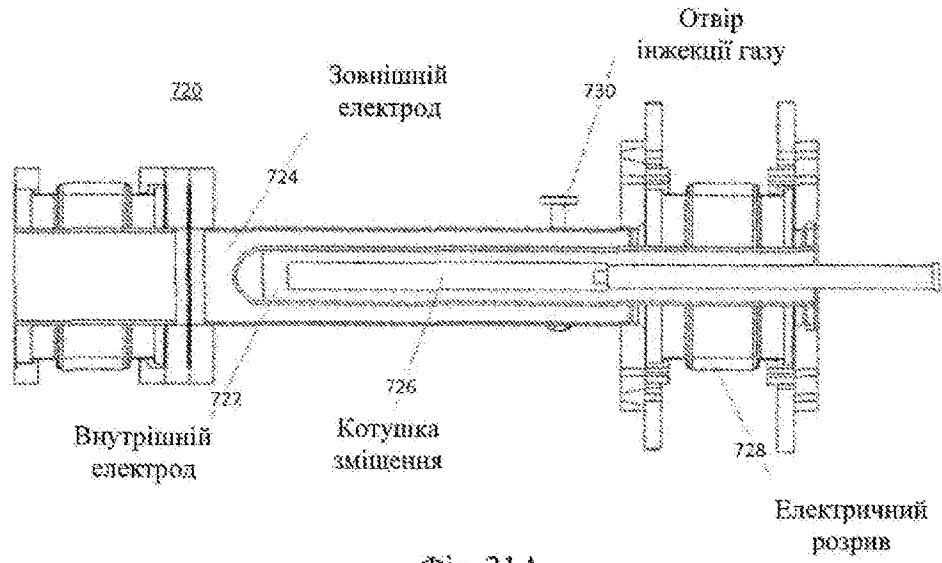
Фиг. 18



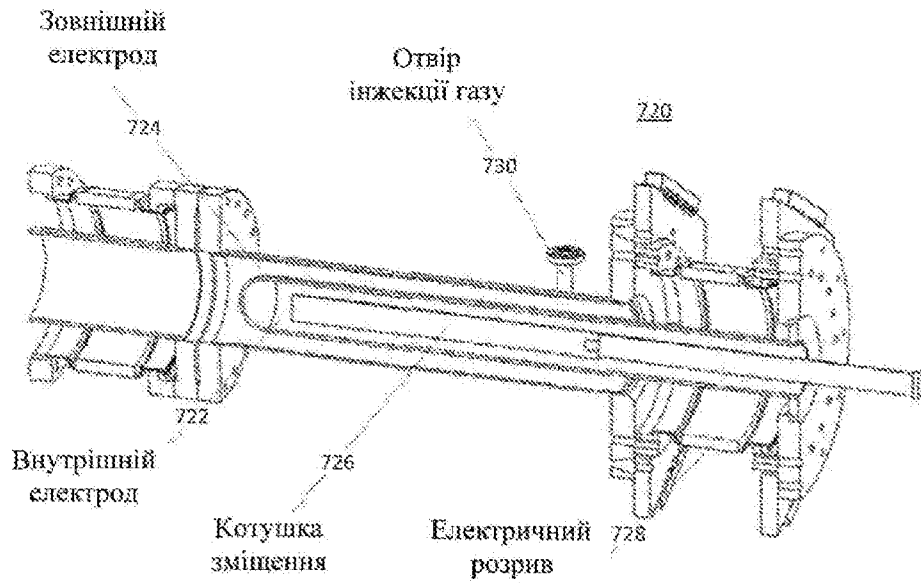
Фіг. 19



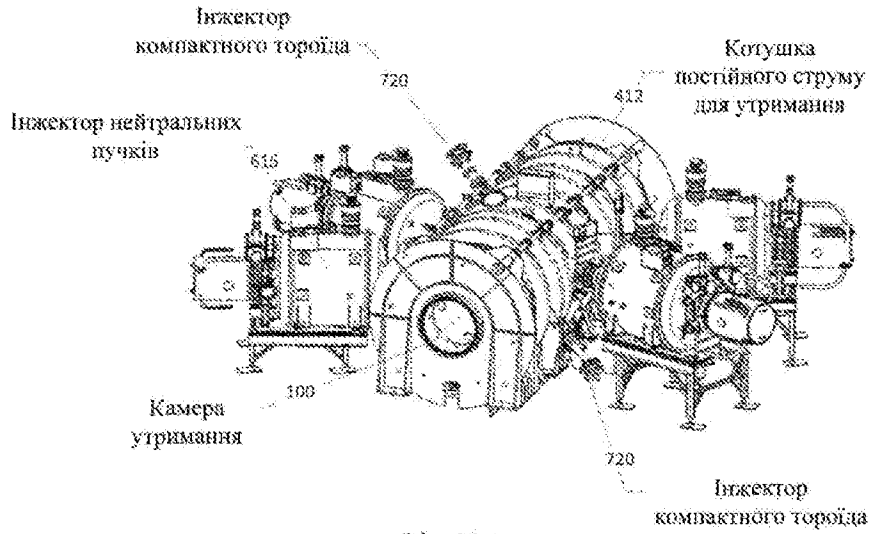
Фіг. 20



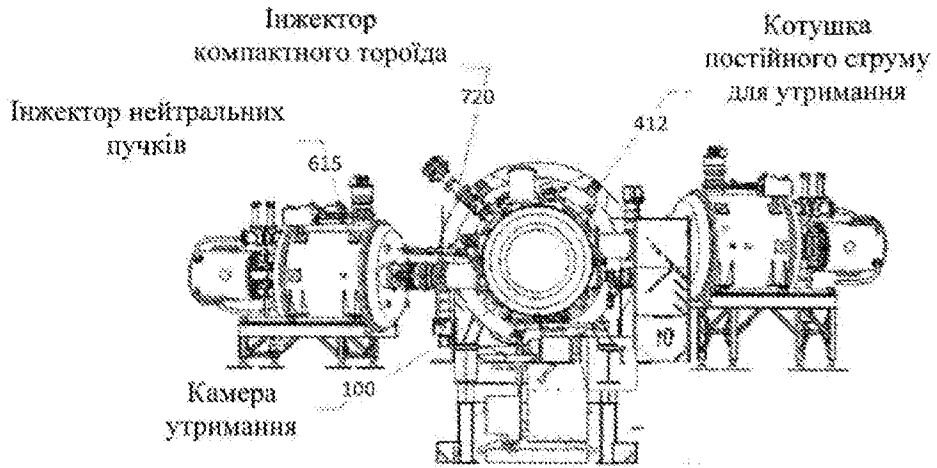
Фіг. 21А



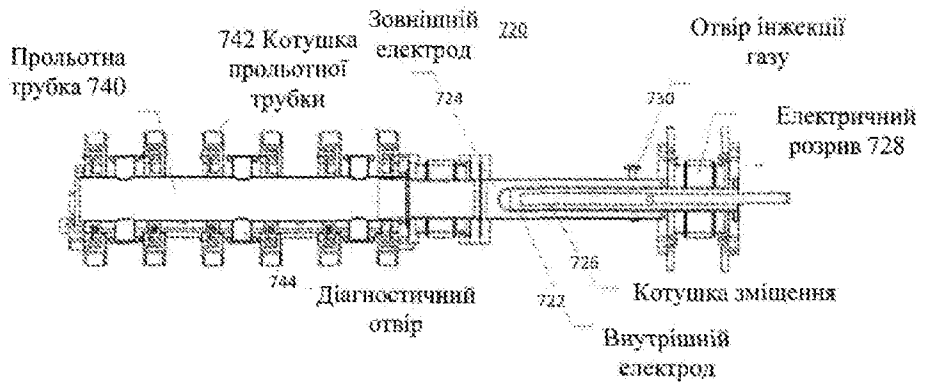
Фіг. 21В



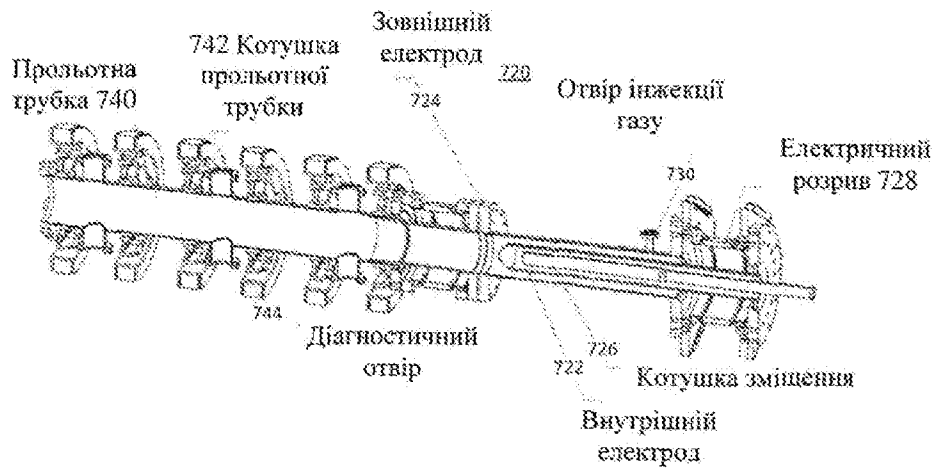
Фіг. 22А



Фіг. 22В



Фіг. 23 А



Фіг. 23В