



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 119027

(13) C2

(51) МПК

G21B 1/05 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки:	а 2014 05080	(72) Винахідник(и):	Тушевські Міхель (US), Біндербауер Міхл (US), Барнз Ден (US), Гарате Евсебіо (US), Гуо Хоянг (US), Путвінські Сергій (FR), Смірнов Артем (US)
(22) Дата подання заявки:	14.11.2012	(73) Власник(и):	ДЗЕ РЕДЖЕНТС ОВ ДЗЕ ЮНІВЕРСІТІ ОВ КАЛІФОРНІЯ, 1111 Franklin Street, 5th Floor, Oakland, CA 94607, United States of America (US)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід:	25.04.2019	(74) Представник:	Шляховецький Ілля Олександрович, реєстр. №190
(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції:	61/559,154, 61/559,721	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:	Cohen et al. "Formation of collisionless high- [beta] plasmas by odd-parity rotating magnetic fields" PHYSICAL REVIEW LETTERS, col. 98, no. 14, 6 April 2007 WO 02/062112 A2, 08.08.2002 Smirnov et al. "Neutral beam dump utilizing cathodic ARC titanium evaporation" FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, vol. 59, no. 1T, July 2010, pages 271-273 Asai et al. "End loss measurement of neutral- beam-injected Field-Reversed Configuration plasma", JOURNAL OF PLASMA AND FUSION RESEARCH SERIES, vol. 5, 2002, pages 220-224 Cohen et al. @RMFo-formed collisionless high-[beta] plasmas: yesterday, today and tomorrow" AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, vol. 1154, 2007, pages 165- 166
(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції:	14.11.2011, 15.11.2011		
(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку:	US, US		
(41) Публікація відомостей про заявку:	25.07.2014, Бюл.№ 14		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	25.04.2019, Бюл.№ 8		
(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ	PCT/US2012/065071, 14.11.2012		

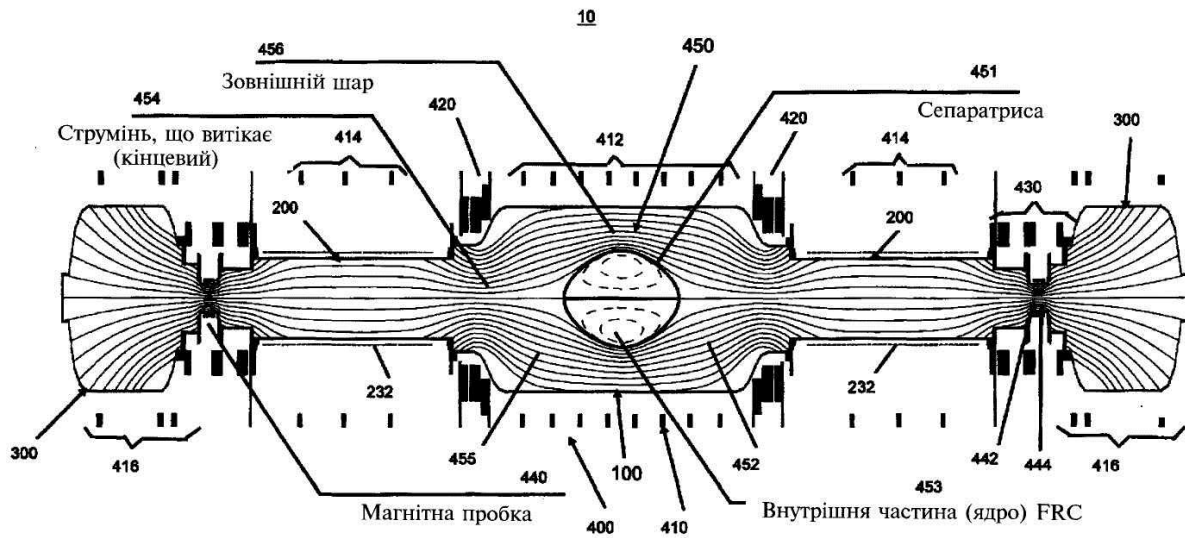
(54) СИСТЕМИ І СПОСОБИ ФОРМУВАННЯ І ПІДТРИМУВАННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОЇ FRC

(57) Реферат:

Системи і способи, які полегшують формування та підтримування нового класу вискоефективних конфігурацій з оберненим полем (FRC). FRC-система для вискоефективної FRC (HPF) включає в себе центральну утримувальну камеру, оточену з протилежних кінців двома секціями формування тета-пінчів з оберненим полем, а поза секціями формування - двома диверторними камерами для контролювання густини незаряджених частинок і забруднювальних домішок. Магнітна система включає в себе послідовність котушок квазіпостійного струму, які розміщені в потрібних позиціях вздовж осі при компонентах FRC-

UA 119027 C2

системи; пробочні котушки квазіпостійного струму між утримувальною камерою і суміжними секціями формування і магнітні пробки між секціями формування і диверторами. Секції формування включають в себе системи формування з імпульсним живленням модульної структури, які забезпечують можливість формування FRC на місці, а потім прискорювати і відсилати (статичне формування) або і формувати і прискорювати одночасно (динамічне формування). FRC-система також включає в себе інжектори пучків нейтральних атомів, інжектор таблеток, системи гетерування, оскові плазмові гармати та електроди зміщення поверхонь незамкненого потоку.



ФІГ. 2

Перехресні посилання на споріднені заявки

[001] Ця заявка претендує на пріоритет за попередньою заявкою на патент США а 61/559,154, поданою 14 листопада 2011 р., і на пріоритет за попередньою заявкою на патент США а 61/559,721, поданою 14 листопада 2011 р., зміст яких включений в цей опис шляхом посилання.

Галузь, якої стосується винахід

[002] Варіанти здійснення винаходу, розкриті в цьому описі, загалом мають відношення до магнітних систем утримання плазми і, більш конкретно, – до систем і способів, які полегшують формування і підтримування конфігурацій з оберненим полем з високою стабільністю, а також утримання частинок, енергії і потоку.

Передумови винаходу

[003] Конфігурація з оберненим полем (Field Reversed Configuration – FRC) належить до класу топологій магнітного утримання плазми, відомих як топології компактного тору (СТ). Така конфігурація демонструє переважно полоїдальні магнітні поля і може мати нульові або незначні вторинні самогенеровні тороїдальні поля (дивись М. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)). В цій конфігурації приваблюють її нескладна геометрія, яка спрощує конструювання та підтримування; наявність необмеженого власного дивертора для полегшення відбору енергії і видалення золи, і дуже високе значення β (β це співвідношення середнього тиску плазми і середнього тиску магнітного поля всередині FRC), тобто висока густина енергії. Великі значення β забезпечують певні переваги щодо економічності роботи і при використанні сучасних ненейтронних видів палива, таких як D-He³ та p-B¹¹.

[004] У традиційному способі формування FRC використовують θ -пінч-технологію оберненого поля, яка продукує гарячу плазму з високою густиною (дивись A.L. Hoffman and J.T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993)). Різновидом цього способу є спосіб перенесення із захопленням (translation-trapping method), при використанні якого плазма, створена у "джерелі" тета-пінча, більш-менш негайно виштовхується одним кінцем до утримувальної камери. Плазмоїд, що переноситься, до того ж опиняється захопленим поміж двома сильними магнітними пробками на кінцях згаданої камери (дивись, наприклад, Н. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, and S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995)). До плазми, після потрапляння її до такої утримувальної камери, можна застосовувати різноманітні способи підігрівання і підтримування струму, такі як інжекція пучка (нейтрального або нейтралізованого), обертові магнітні поля, високочастотне (RF) або омичне нагрівання, тощо. Таке розділення функцій джерела і утримувача має ключові технічні переваги, корисні для можливих у майбутньому термоядерних реакторів. FRC довели свою надзвичайну надійність, стійкість при динамічних явищах формування, перенесення і жорсткого захоплення. Більше того, вони демонструють схильність до приймання переважного плазмового стану (дивись, наприклад, Н. Y. Guo, A.L. Hoffman, K.E. Miller, and L.C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). В останньому десятиріччі значний прогрес був досягнутий у розробці інших способів формування FRC: поєднання сфермаків з протилежно спрямованими спіральностями (дивись, наприклад, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, and T. Okazaki, Nucl. Fusion 39, 2001 (1999)) або підтримування струменя обертовими магнітними полями (rotating magnetic fields – RMF) (дивись, наприклад, I.R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)), що також надає додаткову стабільність.

[005] Останнім часом була значно розвинена запропонована вже давно методика злиття через зіткнення (collision-merging technique) (дивись, наприклад, D.R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966)): два окремі тета-пінчі на протилежних кінцях утримувальної камери одночасно генерують два плазмоїди і з високою швидкістю спрямовують ці плазмоїди назустріч один одному; потім вони стикаються в центрі утримувальної камери і зливаються, утворюючи складену FRC. Під час організації та успішного проведення одного з найбільших на сьогоднішній день FRC-експериментів був застосований традиційний спосіб злиття через зіткнення, який продемонстрував утворення стабільних довготривалих високотемпературних FRC з високою густиною потоку (дивись, наприклад, М. Binderbauer, Н. Y. Guo, М. Tuszewski et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)).

[006] FRC складається з тору, утвореного замкненими силовими лініями всередині сепаратиси, і кільцевого зовнішнього шару, утвореного незамкненими силовими лініями одразу за межами сепаратиси. Цей зовнішній шар, виходячи за межі довжини FRC, зливається в струмені, які є готовим природним дивертором. Топологія FRC співпадає з топологією "плазми в магнітній пастці з оберненим полем" (Field-Reversed-Mirror plasma). Але значна різниця полягає в тому, що FRC-плазма має значення β , яке становить приблизно 10. Невелике власне внутрішнє магнітне поле народжує певну кількість "місцевих" кінетичних частинок, тобто частинок з великими ларморовськими радіусами, які є порівнянними з меншими з радіусів самої

FRC. Схоже, що саме ці сильні кінетичні впливи принаймні частково сприяють значній стабільності попередніх і сучасних FRC, наприклад, таких, що виникають у експериментах зі злиттям через зіткнення.

[007] В типових попередніх експериментах з FRC переважали конвективні втрати, тобто утримання енергії значною мірою визначалося переносом частинок. Частинки дифундували за межі внутрішнього об'єму сепаратрис головним чином радіально, а потім зникали в осьовому напрямку зовнішнього шару. Отже, утримання в FRC залежить від властивостей обох зон: замкнених і незамкнених силових ліній. Час дифузії частинок за межі сепаратрис оцінюють як $\tau_{\perp} \approx a^2/D_{\perp}$ ($a \approx r_s/4$, де r_s – центральний радіус сепаратрис), а D_{\perp} характеризує здатність FRC до дифузії, так що $D_{\perp} \approx 12,5 \rho_{ie}$, де ρ_{ie} є гірорадіусом іонів, який обчислюють при прикладеному зовнішньому магнітному полі. Час утримання частинок в зовнішньому шарі τ_{\parallel} у попередніх експериментах з FRC по суті співпадав із часом перенесення вздовж осі. У стаціонарному стані баланс між радіальними і осьовими втратами частинок дає величину градієнта густини сепаратрис $\delta \approx (D_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$. Для попередніх FRC, які мають значну густину в зоні сепаратрис, час утримання частинок у FRC приблизно дорівнює $(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ (дивись, наприклад, M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations", Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)).

[008] Ще одним недоліком будови попередніх FRC-систем була необхідність застосування зовнішніх мультиполей, щоб контролювати ротаційну нестійкість, таку як переставна нестійкість, що швидко зростає при $n=2$. Таке застосування прикладених зовнішніх квадрупольних полів було типовим засобом для забезпечення поворотального магнітного тиску, щоб перешкоджати зростанню нестійких процесів. Незважаючи на те, що ця технологія виправдовує себе для контролювання стабільності об'ємної термічної плазми, вона спричинює серйозні проблеми у випадку більш динамічних FRC або новіших гібридних FRC, в яких сукупність дуже рухливих частинок з великими орбітами скомбінована зі звичайною термічною плазмою. В цих системах спотворення вісесиметричних магнітних полів, спричинені такими мультипольними магнітними полями, призводить до надзвичайно швидких втрат частинок через стохастичну дифузію у відсутності зіткнень, як наслідок втрати постійності канонічного кутового моменту. Таким чином, важливими є нові рішення щодо забезпечення контролю стабільності без посилення дифузії будь-яких частинок; вони дозволять використати переваги найновіших, потенційно більш ефективних, сучасних концепцій FRC, що досі ще не вивчалися.

[009] Отже, з огляду на вищевикладене, бажано поліпшити утримання і стабільність FRC, щоб мати змогу перейти до використання стаціонарних FRC для різноманітних цілей: від компактних джерел нейтронів (для виробництва медичних ізотопів або для обробки ядерних відходів) до систем мас-сепарації та збагачення, і до застосування в активних зонах ядерних реакторів для синтезу легких ядер і виробництва енергії в майбутньому.

Суть винаходу

[010] В цьому описі запропоновані варіанти систем і способів, які полегшують формування та підтримування нового класу високоефективних конфігурацій з оберненим полем (FRC). У відповідності до цієї нової парадигми "високоефективної FRC", запропонована система об'єднує велику кількість нових ідей і засобів для значного поліпшення утримання в FRC частинок, енергії та потоку, а також забезпечення контролю за стабільністю без будь-яких побічних ефектів.

[011] FRC-система, запропонована в цьому описі, включає в себе центральну утримувальну камеру, оточену з протилежних кінців двома секціями формування тета-пінчів з оберненим полем (reversed-field-theta-pinch), а поза згаданими секціями формування – двома диверторними камерами для контролювання густини незаряджених частинок і забруднювальних домішок. Магнітна система включає в себе послідовність котушок квазіпостійного струму, які розміщені в потрібних положеннях вздовж осі, кожна навколо свого компонента FRC-системи; пробочні котушки квазіпостійного струму з кожного кінця утримувальної камери між нею і згаданою суміжною секцією формування, а також магнітні пробки, які включають в себе компактні пробочні котушки квазіпостійного струму, розташовані між кожною(-им) зі згаданих секцій формування і диверторів, щоб утворювати додаткове напрямне магнітне поле, яке фокусуватиме поверхні магнітного потоку у напрямку диверторів. Секції формування включають в себе системи формування імпульсного живлення модульної структури, які дають змогу формувати FRC in-situ, а потім прискорювати і інжектувати (статичне формування) або і формувати і прискорювати одночасно (динамічне формування).

[012] FRC-система включає в себе інжектори пучка нейтральних атомів та інжектор таблеток. Також до її складу входять системи гетерування й осьові плазмові гармати. Для електричного зміщення поверхонь незамкненого потоку передбачені також електроди зміщення.

[013] Системи, способи, особливості і переваги цього винаходу мають бути або стати

зрозумілими фахівцю після ознайомлення з фігурами та докладним описом, наведеним нижче. Слід мати на увазі, що всі способи, особливості та переваги, які увійшли в цей опис, є включеними в обсяг цього винаходу і охороняються формулою винаходу, що додається. Крім того, слід мати на увазі, що цей винахід не обмежений деталями описаних прикладів здійснення.

Стислий опис фігур

[014] Фігури, які прикладені до цього опису і які є його частиною, ілюструють варіант здійснення винаходу, якому наразі віддається перевага, й разом із загальним описом, наведеним вище, і докладним описом цього варіанта здійснення, якому віддається перевага, наведеним нижче, ці фігури призначені для пояснення і ознайомлення з принципами цього винаходу.

[015] Фіг. 1 ілюструє утримання частинок запропонованою FRC-системою у режимі вискоефективної FRC (high performance FRC – HPF) у порівнянні з режимом звичайної FRC (conventional regime – CR), а також у порівнянні з результатами звичних експериментів з FRC.

[016] Фіг. 2 ілюструє компоненти запропонованої FRC-системи і магнітну топологію FRC, яку можна створити у запропонованій FRC-системі.

[017] Фіг. 3 являє собою вид зверху базового розташування компонентів запропонованої FRC-системи, включаючи розташування, якому віддається перевага, інжекторів нейтральних пучків, електродів, плазмових гармат, магнітних пробок і інжектора таблеток.

[018] Фіг. 4 являє собою принципову схему системи імпульсного живлення для секцій формування.

[019] Фіг. 5 являє собою ізометричну проекцію окремого блока формування з імпульсним живленням.

[020] Фіг. 6 являє собою ізометричну проекцію вузла формувальної труби.

[021] Фіг. 7 являє собою ізометричну проекцію з частковим розрізом системи нейтральних пучків та її головних компонентів.

[022] Фіг. 8 являє собою ізометричну проекцію утримувальної камери з інжекторами нейтральних пучків.

[023] Фіг. 9 являє собою ізометричну проекцію з частковим розрізом варіанта виконання, якому віддається перевага, систем гетерування з використанням Ti та Li .

[024] Фіг. 10 являє собою ізометричну проекцію з частковим розрізом плазмової гармати, встановленої в диверторній камері. Також зображені відповідні магнітна пробка і електродний вузол дивертора.

[025] Фіг. 11 ілюструє розташування, якому віддається перевага, кільцевого електрода зміщення на осьовому кінці утримувальної камери.

[026] Фіг. 12 ілюструє змінювання радіуса виключеного потоку, яке досягається в FRC-системі за допомогою групи зовнішніх діамантних кілець на обох секціях формування тетрапінчів з оберненим полем і магнітних датчиків, вбудованих у метал всередині утримувальної камери. Вимірювання часу починається від моменту синхронізованого розвороту поля в джерелах формування, й відстань z задана відносно серединної площини, що проходить через вісь установки.

[027] Фіг. 13 (a)-13 (d) ілюструють дані репрезентативного не-HPF непідтримуваного розряду у запропонованій FRC-системі. У вигляді функцій від часу відображені (a) радіус виключеного потоку на серединній площині, (b) лінійно проінтегрована густина за даними 6-хордового CO_2 -інтерферометра, встановленого на серединній площині, (c) радіальні профілі абелевої інверсії густини за даними CO_2 -інтерферометра і (d) загальна температура плазми, виходячи з рівноваги тиску.

[028] Фіг. 14 ілюструє осьові профілі виключеного потоку у задані моменти часу для того самого розряду в запропонованій FRC-системі, який зображено на Фіг. 13.

[029] Фіг. 15 являє собою ізометричну проекцію сідлоподібних котушок, змонтованих із зовнішнього боку утримувальної камери.

[030] Фіг. 16 ілюструє кореляцію часу існування FRC і тривалості імпульсу впорскування нейтрального пучка. Як показують ці графіки, чим довше тривають імпульси пучка, тим довше існують FRC.

[031] Фіг. 17 ілюструє самостійний і комбінований вплив різних компонентів FRC-системи на ефективність FRC та досягнення нею HPF-режиму.

[032] Фіг. 18(a)-18(d) ілюструють дані репрезентативного непідтримуваного HPF-розряду у запропонованій FRC-системі. У вигляді функцій від часу відображені (a) радіус виключеного потоку на серединній площині, (b) лінійно проінтегрована густина, за даними 6-хордового CO_2 -інтерферометра, встановленого на серединній площині, (c) радіальні профілі абелевої інверсії

густини за даними CO₂-інтерферометра і (d) загальна температура плазми, виходячи з рівноваги тиску.

[033] Фіг. 19 ілюструє утримання потоку в залежності від температури електронів (T_e). Це графічне зображення нещодавно винайденого надефективного режиму для HPF-розрядів.

[034] Слід зауважити, що на наведених фігурах необов'язково був витриманий масштаб зображення, і що елементи, схожі за структурою або функціями, на всіх фігурах, де вони показані з ілюстративною метою, позначені однаковими позиціями. Також треба відзначити, що єдиним призначенням цих фігур є полегшення характеризувати різних варіантів здійснення цього винаходу, розкритих у цьому описі. Ці фігури необов'язково розкривають кожен аспект цього винаходу і не обмежують обсяг формули винаходу.

Докладний опис

[035] Запропоновані в цьому описі варіанти здійснення цього винаходу стосуються систем і способів, які полегшують формування і підтримування вискоєфективних конфігурацій з оберненим полем (FRC), котрі є більш стабільними, а також забезпечують краще утримання частинок, енергії і потоку порівняно з традиційними FRC. Для перевірки існування найкращого режиму утримання в FRC були досліджені різні допоміжні системи і режими роботи. Ці зусилля призвели до революційних відкриттів і розробки парадигми вискоєфективної FRC, розкритої у цьому описі. У відповідності до цієї нової парадигми, запропоновані системи і способи об'єднують велику кількість нових ідей і засобів для значного поліпшення утримання в FRC, що проілюстровано Фіг. 1, а також забезпечення контролю за стабільністю без будь-яких побічних ефектів. Як детальніше пояснено нижче, Фіг. 1 відображає утримання частинок у FRC-системі 10, описаній нижче (дивись Фіг. 2 і Фіг. 3), коли вона працює у режимі вискоєфективної FRC (High Performance FRC regime – HPF) для формування і підтримування FRC, порівняно з роботою у звичайному режимі (conventional regime – CR) для формування і підтримування FRC, а також – у порівнянні з утриманням частинок у відповідності до загальноприйнятих режимів для формування і підтримування FRC, які використовувалися в інших експериментах. В цьому описі показані загалом і в деталях окремі інноваційні компоненти FRC-системи 10 і винайдені способи, а також – їх сумісний ефект.

Опис FRC-системи

Вакуумна система

[036] На Фіг. 2 і Фіг. 3 схематично зображена запропонована FRC-система 10. FRC-система 10 включає в себе центральну утримувальну камеру 100, оточену двома діаметрально протилежними секціями 200 формування тета-пінчів з оберненим полем і, поза згаданими секціями 200 формування, двома диверторними камерами 300 для контролювання густини незаряджених частинок і забруднювальних домішок. Запропонована FRC-система 10 була збудована для забезпечення надвисокого вакууму і працює при типовому базовому тиску у 10^{-8} торр (133×10^{-5} Па). Такі низькі значення тиску потребують застосування з'єднувальних фланців подвійної відкачки між сполученими компонентами, металевих ущільнювальних кілець, надчистих внутрішніх стінок, а також ретельної попередньої обробки поверхонь усіх частин перед складанням, наприклад, фізичного і хімічного очищення з подальшим прожарюванням під вакуумом при 250 °C протягом 24 год. і очищення жевріючим розрядом в присутності водню.

[037] Докладно розглянуті нижче (дивись Фіг. 4-6) секції 200 формування тета-пінчів з оберненим полем є стандартними секціями формування тета-пінчів з оберненим полем (field-reversed-theta-pinches – FRTP), проте вони обладнані сучасною системою формування з імпульсним живленням. Кожна секція 200 формування є стандартною трубкою, виготовленою з непрозорого промислового кварцу, вкритого зсередини 2-міліметровим шаром надчистого кварцу. Утримувальна камера 100 виготовлена з нержавіючої сталі, що дозволяє виконати потрібну кількість радіальних і тангенціальних отворів; крім того, вона призначена для "консервації" потоку в масштабі часу описаного нижче експерименту та обмежує швидкі магнітні перехідні процеси. В середині FRC-системи 10 вакуум створюють і зберігають за допомогою комплексу сухих спіральних насосів низького вакууму, турбомолекулярних насосів і кріонасосів.

Магнітна система

[038] На Фіг. 2 і Фіг. 3 показана магнітна система 400. Фіг. 2, серед іншого, ілюструє магнітний потік в FRC і профілі густини (як функції від радіальних і осьових координат), властиві FRC 450, створюваній FRC-системою 10. Ці профілі були одержані за допомогою чисельного моделювання 2-D резистивного МГД-генератора Холла (2-D resistive Hall-MHD) з використанням програмного забезпечення, розробленого для моделювання таких систем і методів, які стосуються FRC-системи 10; і вони добре узгоджуються з даними експериментальних вимірювань. Як видно на Фіг. 2, FRC 450 складається з тору, утвореного замкненими силовими лініями і розташованого у внутрішній частині (ядрі) 453 конфігурації 450 з оберненим полем,

всередині сепаратриси 451, і кільцевого зовнішнього шару 456, утвореного незамкненими силовими лініями 452 одразу за межами сепаратриси 451. Цей зовнішній шар 456, виходячи за межі довжини FRC, зливається в кінцеві струмені 454, утворюючи готовий природний дивертор.

[039] Основна магнітна система 410 включає в себе послідовність котушок 412, 414 і 416 квазіпостійного струму, розташованих вздовж осі FRC-системи 10 у визначених місцях, кожна навколо свого компонента, тобто утримувальної камери 100, секцій 200 формування і диверторів 300. Котушки 412, 414 і 416 квазіпостійного струму живляться від імпульсних джерел квазіпостійного струму і створюють в утримувальній камері 100, секціях 200 формування і диверторах 300 базове поле підмагнічування з індукцією близько 0,1 Тл. Крім котушок 412, 414 і 416 квазіпостійного струму, основна магнітна система 410 включає в себе пробочні котушки 420 квазіпостійного струму (що живляться від імпульсних джерел) на кожному з кінців утримувальної камери 100, перед суміжною з ним секцією 200 формування. Ці пробочні котушки 420 квазіпостійного струму утворюють магнітні пробки з дзеркальним відношенням до 5 і мають незалежне збудження для керування зрівноваженою формою. Крім того, між кожною секцією 200 формування і відповідним дивертором 300 розташовані магнітні пробки 440. Магнітні пробки 440 включають в себе компактні пробочні котушки 430 квазіпостійного струму і котушки 444 магнітної пробки. Пробочна котушка 430 квазіпостійного струму включає в себе три окремі котушки 432, 434 і 436 (що живляться від імпульсних джерел), які створюють додаткові напрямні поля для спрямування поверхонь 455 магнітного потоку до проходу 442 з малим діаметром, утвореного котушками 444 магнітної пробки. Котушки 444 магнітної пробки, які намотані навколо проходу 442 з малим діаметром і живляться імпульсним джерелом з LC-схемою, створюють магнітну пробку із сильним магнітним полем до 4 Тл. Весь цей пристрій з котушок призначений для того, щоб міцно стискати поверхні магнітного потоку 455 і проводити їх разом з кінцевими струменями 454 плазми до віддалених камер 310 диверторів 300. На завершення, зовні утримувальної камери 100 розташована група сідлоподібних "антен" 460 (дивись Фіг. 15), по дві з кожного боку від серединної площини, які живляться від джерел постійного струму. Ці сідлоподібні антени 460 можна конфігурувати так, щоб утворювати квазістатичне магнітне поле з властивостями диполя або квадруполя, що мають індукцію близько 0,01 Тл, для контролювання ротаційної нестійкості та/або керування електронним струменем. За допомогою сідлоподібних антен 460 можна гнучко змінювати магнітні поля, роблячи їх симетричними або антисиметричними відносно серединної площини установки, залежно від напрямків прикладених струменів.

Системи формування з імпульсним живленням

[040] Системи 210 формування з імпульсним живленням працюють за модифікованим тета-пінч принципом. Пристрій має дві системи, кожна з яких живить свою секцію 200 формування. Фіг. 4-6 ілюструють основні компоненти і конструкцію системи 210 формування. Живлення системи 210 формування має імпульсний характер і модульну конструкцію, яка складається з окремих блоків 220; кожен з блоків живить підгрупу котушок 232, зібраних у обойму 230, одну з багатьох, що оточують кварцову трубку 240 формування. Кожен блок 220 складається з конденсаторів 221, індукційних котушок 223, швидких перемикачів 225 великих струмів з відповідними електронними компонентами тригера 222 і скидання напруги 224. Сумарно кожна система 210 формування накопичує енергію в межах 350-400 кДж, що забезпечує до 35 ГВт потужності для формування та прискорення FRC. Злагоджена робота всіх цих компонентів досягається за допомогою сучасних систем керування електронними компонентами тригера 222 і скидання напруги 224, які дозволяють синхронізувати дії систем 210 формування кожної секції формування та мінімізувати до десятків наносекунд коливання від перемикачів. Перевага цієї модульної конструкції полягає в її гнучкому спрацьовуванні. FRC можна формувати на місці, а потім прискорювати і передавати (статичне формування) або і формувати і прискорювати одночасно (динамічне формування).

Енжектори нейтральних пучків

[041] Пучки нейтральних атомів застосовують у FRC-системах 10 для забезпечення нагрівання і підтримання струму, а також для створення тиску швидких частинок. Як це показано на Фіг. 3 і Фіг. 8, навколо центральної утримувальної камери 100 розташовані окремі канали пучків, які включають в себе системи 610 і 640 інжекторів пучків нейтральних атомів, які впорскують швидкі частинки тангенціально відносно плазми у FRC (і перпендикулярно до осі утримувальної камери 100) з таким прицільним параметром, що бажана зона захоплення знаходиться цілком в межах сепаратриси 451 (дивись Фіг. 2). Кожна інжекторна система 610 і 640 здатна впорскувати до плазми в FRC нейтральний пучок потужністю до 1 МВт і з енергіями частинок від 20 кеВ до 40 кеВ. Системи 610 і 640 збудовані на базі багатоапертурного вилучення іонів з джерела позитивних іонів і використовують геометричне фокусування,

інерційне охолодження екранних сіток для вилучення іонів і диференціальне відкачування. Крім різниці між використовуваними джерелами плазми, системи 610 і 640 в першу чергу відрізняються своєю конструкцією, що пристосована до вимог монтування у відповідних місцях, які забезпечують можливість впорскування збоку або зверху. Типова будова таких інжекторів нейтральних пучків проілюстрована на Фіг. 7 на прикладі бокової інжекторної системи 610. Як це показано на Фіг. 7, кожна окрема система 610 нейтральних пучків включає в себе ВЧ джерело 612 плазми (в системах 640 замість нього використано дугове джерело), розташоване у вхідному кінці із магнітним екраном 614, який закриває кінець. Оптичне джерело іонів і емісійна сітка 616 з'єднані з джерелом 612 плазми, а між оптичним джерелом іонів з емісійною сіткою 616 і нейтралізатором 622 встановлений вакуумний затвор 620. Відхилювальний магніт 624 і вловлювач 628 іонів розміщені між нейтралізатором 622 і прицільним пристроєм 630 у вихідному кінці. Система охолодження включає в себе два кріогенні охолоджувачі 634, дві кріопанелі 636 і охолоджуваний зрідженим азотом екран 638. Така гнучка конструкція дозволяє керувати великою кількістю параметрів FRC.

Енжектор таблеток

[042] Щоб мати засоби для впорскування нових частинок і задля поліпшення контролювання вмісту частинок у FRC, у FRC-системах 10 застосовують 12-ствольний інжектор 700 таблеток (дивись, наприклад, I. Vinyar et al., "Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE and HL-2A", Proceedings of 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 to 10/01 (2010)). На Фіг. 3 показано, де саме в FRC-системі 10 встановлений інжектор 700 таблеток. Циліндричні таблетки (D приблизно 1 мм, L приблизно 1-2 мм) впорскують до FRC зі швидкістю в межах від 150 км/с до 250 км/с. Кожна окрема таблетка містить 5×10^{19} атомів водню, які можна вважати тотожними частинкам зі складу FRC.

Системи гетерування

[043] Як добре відомо, наявність нейтрального газу – це серйозна проблема в усіх утримувальних системах. Обмін зарядами і процеси "рециклінгу" (вивільнення зі стінок холодних домішок) можуть мати руйнівний вплив на утримання енергії і частинок. До того ж, будь-яка значна густина нейтрального газу в зовнішньому шарі або поблизу до нього призводить до миттєвих втрат або принаймні істотно скорочує час життя впорснутих частинок із великими орбітами (високоенергетичних) (під "великими" розуміють такі орбіти, які за розмірами зрівнюються з масштабами топології FRC, або принаймні такі, що їхні радіуси значно перевищують характерне значення градієнта магнітного поля) – це явище, яке є шкідливим для усіх енергетичних застосувань плазми, і в тому числі – для синтезу через нагрівання допоміжними пучками.

[044] Обробка поверхні – це засіб контролювання або зменшення руйнівного впливу нейтрального газу і домішок на утримувальні системи. Рухаючись в цьому напрямку, в запропонованій цим винаходом FRC-системі 10 застосовані системи осаджування титану (Ti) 810 і літію (Li) 820, які вкривають поверхні з боку плазми в утримувальній камері 100 і диверторах 300 плівками (десятки мікрометрів завтовшки) з Ti та/або Li. Ці покриття наносять із застосуванням технології осаджування з парової фази. Тверді Li та/або Ti випарюють, а потім сублімують на сусідніх поверхнях з утворенням покриття. Джерелами є атомарна піч з напрямними соплами (у випадку Li) 822 або тверді кульки, що підігріваються в напрямному кожусі (у випадку Ti) 812. Системи для випарювання Li зазвичай працюють у безперервному режимі, тоді як субліматори Ti здебільшого працюють періодично, у перервах між оперуванням з плазмою. Для прискорення осаджування робочі температури у цих системах становлять понад 600 °C. Щоб отримати хороше покриття стінок, зі стратегічної точки зору треба розмістити багато випарників/субліматорів. Фіг. 9 деталізує розміщення у FRC-системі 10, якому віддається перевага, систем 810 і 820 осаджування, потрібних для гетерування. Ці покриття діють як гетерувальні поверхні і ефективно відкачують атомарні та молекулярні різновиди водню (H і D). Також ці покриття знижують до незначних рівнів кількості інших типових домішок, таких як вуглець і кисень.

Магнітні пробки

[045] Як вже було сказано раніше, в FRC-системі 10 застосовані групи пробочних котушок 420, 430, і 444, що показані на Фіг. 2 і Фіг. 3. Перша група пробочних котушок 420 розміщена на обох кінцях осі утримувальної камери 100 і живиться окремо від утримувальних котушок 412, 414 і 416 основної магнітної системи 410. Перша група пробочних котушок 420 головним чином допомагає спрямовувати і утримувати вісь FRC 450 під час злиття та забезпечує керування зрівноваженою формою під час її поповнення. Перша група пробочних котушок 420 створює магнітні поля з більшим номіналом (приблизно від 0,4 Тл до 0,5 Тл), ніж номінал центрального утримувального поля, утвореного центральними утримувальними котушками 412. Друга

група пробочних котушок 430, яка включає три компактні пробочні котушки 432, 434 і 436 квазіпостійного струму, розміщена між секціями 200 формування і диверторами 300 і живиться від спільного імпульсного джерела. Пробочні котушки 432, 434 і 436, разом з більш компактними імпульсними котушками 444 магнітної пробки (що живляться від ємнісного блока) і фізичними звуженнями 442, утворюють магнітні пробки 440, які мають вузький прохід з малою газовою провідністю і дуже сильним магнітним полем (від 2 Тл до 4 Тл, з часом зростання 10-20 мс). Найбільш компактні імпульсні котушки 444 магнітної пробки мають малі радіальні розміри (внутрішній діаметр 20 см) і подібну довжину, тоді як утримувальні котушки 412, 414 і 416 мають пласку як млинець форму з внутрішнім діаметром більше метра. Призначення магнітних пробок 440 багатоцільове: (1) Котушки 432, 434, 436 і 444 міцно стискають і спрямовують поверхні 452 магнітного потоку і кінцеві струмені 454 плазми до віддалених диверторних камер 300. Це гарантує належне потрапляння частинок, що вилітають, до диверторів 300, а також безперервність поверхонь потоку 455, які простягаються від зони незамкнених силових ліній 452 центральної частини FRC 450 до диверторів 300. (2) Фізичні звуження 442 FRC-системи 10, крізь які, за допомогою котушок 432, 434, 436 і 444, утворюється прохід для поверхонь 452 магнітного потоку і кінцевих струменів 454 плазми, є перешкодою для потоку нейтрального газу з плазмових гармат 350, які знаходяться у диверторах 300. Таким самим чином конструкції 442 запобігають зворотному витіканню газу з секцій 200 формування до диверторів 300, у такий спосіб зменшуючи кількість нейтральних частинок, які треба впорснути до всієї FRC-системи 10 на початковому етапі запуску FRC. (3) Сильні осьові магнітні пробки, утворені котушками 432, 434, 436 і 444, зменшують осьові втрати частинок і тому зменшують здатність до дифузії частинок, що рухаються паралельно вздовж незамкнених силових ліній.

Осьові плазмові гармати

[046] Струмені плазми з гармат 350, змонтованих у диверторних камерах 310 диверторів 300, призначені для підвищення стабільності та ефективності нейтральних пучків. Гармати 350 змонтовані по осі всередині камер 310 дивертора 300, як це видно на Фіг. 3 і Фіг. 10, і виробляють плазму, яка тече вздовж незамкнених силових ліній 452 у диверторі 300 і в напрямку утримувальної камери 100. Гармати 350 працюють при газовому розряді з дуже високою густиною газу в газорозрядному каналі, і призначені для генерування повністю іонізованої плазми силою струму в декілька кілоампер протягом проміжку часу від 5 мс до 10 мс. Гармата 350 включає в себе імпульсну магнітну котушку, яка узгоджує вихідний струм плазми з бажаною кількістю плазми в утримувальній камері 100. Технічні характеристики гармат 350 такі: канал має зовнішній діаметр від 5 см до 13 см та внутрішній діаметр до приблизно 10 см, а також дає струм розряду 10-15 кА і 400-600 В з внутрішнім магнітним полем гармати від 0,5 Тл до 2,3 Тл.

[047] Струмені плазми з гармати мають змогу проходити крізь магнітні поля магнітних пробок 440 і потрапляти до секції 200 формування та утримувальної камери 100. Ефективність перенесення плазми крізь магнітну пробку 440 зростає разом зі збільшенням відстані між гарматою 350 і магнітною пробкою 440, а також разом з розширюванням і скорочуванням магнітної пробки 440. При відповідних умовах кожна з гармат 350 може надсилати крізь магнітні пробки 440 силою 2-4 Тл приблизно 10^{22} протонів/с з високою температурою іонів і електронів: близько 150-300 еВ та близько 40-50 еВ, відповідно. Гармати 350 забезпечують істотну дозаправку зовнішнього шару 456 FRC і поліпшують загальне утримання частинок у FRC.

[048] Для подальшого збільшення густини плазми до потоку плазми з гармат 350 можна за допомогою газових балонів вдути додаткову кількість газу. Цей спосіб дозволяє підвищити в рази густину інжектваної плазми. Встановлення газових балонів у FRC-системі 10 з того самого боку від магнітної пробки 440, що й дивертор 300, покращує підзарядження зовнішнього шару 456 FRC, формування всієї FRC 450 і лінійну зв'язність плазми.

[049] Знаючи всі згадані вище параметри регулювання, а також беручи до уваги, що є можливість користуватися як лише однією з плазмових гармат, так і двома одразу, легко уявити собі різноманітні робочі режими, які стають здійсненними.

Електроди зміщення

[050] Електричне відхилення поверхонь незамкненого магнітного потоку може створювати радіальні потенціали, які посилюватимуть азимутальний $E \times B$ рух, а це дає механізм регулювання, подібний до повертання ручки налаштування, щоб шляхом змінювання швидкості керувати як обертанням незамкненого поля лінійної плазми, так і дійсним ядром 450 FRC. З метою досягнення такого керування FRC-система 10 використовує різноманітні електроди, зі стратегічної точки зору розміщені в різних частинах установки. На Фіг. 3 показані електроди зміщення, розташовані у вибраних місцях FRC-системи 10.

[051] Теоретично існує 4 класи електродів: (1) точкові електроди 905 в утримувальній камері 100, які контактують із конкретними незамкненими силовими лініями 452 зовнішнього шару FRC 450, що забезпечує локальне заряджання, (2) кільцеві електроди 900 між утримувальною камерою 100 і секціями 200 формування для заряджання найдаальших від центру шарів 456 магнітного потоку в азимутально-симетричний спосіб, (3) стеки концентричних електродів 910 в диверторах 300 для заряджання множини концентричних шарів 455 потоку (при цьому вибором цих шарів можна керувати із застосуванням регульовальних котушок 416 для регулювання магнітного поля дивертора так, щоб бажані шари потоку 456 закінчувалися на потрібних електродах 910), і, нарешті, (4) аноди 920 (дивись Фіг. 10) власне плазмових гармат 350 (які перехоплюють внутрішні поверхні 455 незамкненого потоку біля сепаратрисы FRC 450). На Фіг. 10 і Фіг. 11 зображені деякі з названих вище типових конструкцій.

[052] В всіх цих випадках електроди живляться від імпульсних джерел або джерел постійного струму з напругою 800 В. В залежності від розмірів електродів і того, з якими поверхнями в потоці вони перетинаються, струми піддаються керуванню у кілоамперному діапазоні.

Непідтримуване функціонування FRC-системи – Звичайний режим

[053] Стандартне формування плазми у FRC-системі 10 іде за добре відомою технологією тета-пінчів з оберненим полем. Типовий процес створення FRC починається приведенням котушок 412, 414, 416, 420, 432, 434 і 436 квазіпостійного струму до сталого режиму функціонування. Далі електронні компоненти з імпульсним живленням тета-пінчів з оберненим полем систем 210 формування з імпульсним живленням змушують імпульсні котушки зі швидким реверсом магнітного поля 232 згенерувати у секції 200 формування тимчасове обернене зміщення близько $-0,05$ Тл. В цей момент нейтральний газ у заздалегідь заданій кількості, що становить 9-20 фунт/дюйм² ($0,0620$ - $0,1379$ МПа), впорскують в два об'єми формування, визначені камерами 240 у вигляді кварцових трубок ("північної" та "південної") секцій 200 формування, за допомогою групи азимутально зорієнтованих "видихальних" клапанів, які знаходяться у фланцях на зовнішніх кінцях секцій 200 формування. Далі невеличке високочастотне (RF) (приблизно сотні кілогерц) магнітне поле генерується групою антен, розташованих на поверхні кварцових трубок 240, що започатковує "перед-перед-іонізацію" у вигляді локальних зародків зон іонізації всередині стовпчиків нейтрального газу. За цим іде застосування модуляцій, що формують тета-кільце, до імпульсних котушок 232 зі швидким реверсом магнітного поля, які керують струмом; а це веде до більш глобальної перед-іонізації газових стовпчиків. Е нарешті запускаються головні батареї імпульсного живлення системи 210 формування з імпульсним живленням, щоб змусити імпульсні котушки 232 зі швидким реверсом магнітного поля утворити магнітне поле з прямим зміщенням силою до $0,4$ Тл. Цей етап можна пов'язати з часом так, що однорідне поле з прямим зміщенням утвориться одразу по всій довжині трубок 240 формування (статичне формування), або буде одержана послідовна перистальтична модуляція магнітного поля вздовж осі трубок 240 формування (динамічне формування).

[054] В усьому цьому процесі формування реальне перемагнічування поля плазми відбувається дуже швидко, в межах приблизно 5 мкс. Мультигігаватні імпульси енергії, що потрапляють в плазму під час її формування, з легкістю утворюють гарячі FRC, які потім виштовхуються з секцій 200 формування або із застосуванням послідовних прямих модуляцій магнітного поля (магнітної перистальтики), або тимчасовим збільшенням струму в останніх котушках з груп котушок 232 біля зовнішніх кінців осі трубок 210 формування (з утворенням магнітного градієнта, спрямованого в осьовому напрямку до утримувальної камери 100). Обидві первинні FRC (північна і південна), сформовані і прискорені в такий спосіб, після цього розширюються в більшому діаметрі утримувальної камери 100, де котушки 412 квазіпостійного струму створюють поле з прямим зміщенням, яким можна регулювати це радіальне розширення і забезпечувати рівноважний зовнішній магнітний потік.

[055] Опинившись поблизу серединної площини утримувальної камери 100, північна і південна первинні FRC зіштовхуються. Під час цього зіткнення осьові кінетичні енергії північної і південної первинних FRC значною мірою термалізуються, поки самі FRC зливаються, утворюючи зрештою єдину FRC 450. Еснує безліч способів діагностування плазми в утримувальній камері 100 для вивчення рівноваги FRC 450. FRC-система 10, функціонуючи в типових умовах, створює компактну FRC з сепаратрисою радіусом приблизно $0,4$ м і довжиною в напрямку осі приблизно 3 м. Еншими характеристиками є зовнішні магнітні поля силою близько $0,1$ Тл, густина плазми приблизно $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ і загальна температура плазми до 1 кеВ. Без будь-якого підтримування існування, тобто будь-якого підігрівання та/або збудження струмів із застосуванням впорскування нейтральних пучків, або якихось інших додаткових засобів, час

існування цих FRC не перевищує 1 мс, що є власним характерним часом розпаду конфігурації.

Експериментальні дані непідтримуваного процесу – звичайний режим

[056] На Фіг. 12 показано, як типово змінюється у часі радіус виключеного потоку ($r_{\Delta\Phi}$), який приблизно співпадає з радіусом сепаратиси (r_s), ілюструючи таким чином динаміку процесу злиття тета-пінчів в FRC 450. Обидва (північний і південний) самостійні плазмоїди створюються одночасно, а потім прискорено "вистрілюються" з відповідних секцій 200 формування з надзвуковою швидкістю ($v_z \approx 250$ км/с) і зіштовхуються поблизу серединної площини (при $z=0$). Під час цього зіткнення плазмоїди стискаються в осьовому напрямку, після чого відбувається швидке радіальне і осьове розширення, яке передуює остаточному злиттю з утворенням FRC 450. Динаміка злиття FRC 450 в обох напрямках (радіальному і осьовому) засвідчується детальними вимірами провалів густини та болометричною томографією.

[057] На Фіг. 13 показані у вигляді залежностей від часу дані про презентативний непідтримуваний розряд в FRC-системі 10. FRC ініціюється у момент $t=0$. Радіус виключеного потоку на осьовій серединній площині установки зображений на Фіг. 13(a). Ці дані отримані від магнітних датчиків, вмонтованих безпосередньо в стальну стінку утримувальної камери для вимірювання осьового магнітного поля. Стальна стінка є хорошим захистом потоку в масштабах часу цього розряду.

[058] Лінійно проінтегрована густина показана на Фіг. 13(b) (дані від 6-хордового $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$ інтерферометра, встановленого на $z=0$). Приймаючи до уваги вертикальне (y) зміщення FRC, одержане за результатами вимірів методом болометричної томографії, абелева інверсія дає контури густини, які приведені на Фіг. 13(c). Після певних осьових і радіальних коливань протягом перших 0,1 мс, FRC заспокоюється, демонструючи "пустий" профіль густини. Цей профіль достатньо плаский, зі значною густиною на осі, як того і вимагає 2-D-рівновага FRC.

[059] Загальна температура плазми на Фіг. 13(d) виведена з рівноваги тиску і, як це видно, повністю відповідає розсіянню Томсона і спектроскопічним вимірюванням.

[060] Аналіз всієї зони виключеного потоку вказує на те, що форма сепаратиси FRC (апроксимована по осьовим профілям виключеного потоку) поступово еволюціонує від кільцевої до еліптичної. Цей перехід, відображений на Фіг. 14, відповідає поступовій перебудові магнітної конфігурації з подвійної до одинарної FRC. Е насправді, за грубими оцінками, саме в цей момент під час злиття перебудовуються близько 10 % магнітних потоків двох первинних FRC.

[061] За час існування FRC довжина FRC неухильно скорочується від 3 м до приблизно 1 м. Це скорочення, помітне на Фіг. 14, вказує на те, що в утримуваній FRC домінують конвективні втрати енергії. Оскільки тиск плазми всередині об'єму сепаратиси зменшується швидше за тиск зовнішнього магнітного поля, натягнення магнітних силових ліній на кінцевих ділянках стискають FRC в напрямку осі, підтримуючи радіально-осьову рівновагу. У розряді, продемонстрованому на Фіг. 13 і Фіг. 14, магнітний потік FRC, склад частинок і тепла енергія (близько 10 МВб, 7×10^{19} частинок і 7 кДж, відповідно) зменшуються, грубо кажучи, на порядок величини за першу мілісекунду, за яку рівновага у FRC помітно слабшає.

Підтримуване функціонування – HPF-режим

[062] Приклади з Фіг. 12-14 є характерними для згасаючої FRC, існування якої ніяк не підтримується. Проте для FRC-системи 10 розроблено декілька способів підтримання конфігурації і подальшого поліпшення утримання FRC (внутрішнього ядра і зовнішнього шару) до HPF-режиму.

Нейтральні пучки

[063] По-перше, швидкі (H) нейтральні частинки впорскують перпендикулярно до B_z пучками з вісьмох інжекторів 600 нейтральних пучків. Ці пучки нейтральних частинок впорскують, починаючи з того моменту, коли північна і південна первинні FRC зливаються разом в утримувальній камері 100 в єдину FRC 450. Швидкі іони, які виникають головним чином за рахунок обміну зарядами, мають бетатронні орбіти (з радіусами, більшість з яких можна порівнювати з масштабами топології FRC, або принаймні значно більшими, ніж характерні значення градієнта магнітного поля), що підсилює азимутальний струм FRC 450. Після цього певна частка цього заряду (через 0,5-0,8 мс після "пострілу") й достатньо велика кількість швидких іонів значно підвищують внутрішню стабільність FRC і її здатність до утримання (дивись, наприклад, M.W. Binderbauer and N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)). Більше того, з точки зору перспектив підтримання, промені з інжекторів 600 нейтральних пучків є основним засобом для збудження струму і нагрівання плазми FRC.

[064] Коли FRC-система 10 знаходиться в режимі плазми, швидкі іони гальмуються в першу чергу електронами плазми. На ранній стадії існування розряду типові усереднені по орбіті значення часу гальмування швидких іонів становлять 0,3-0,5 мс, що призводить до значного розігріву FRC, і в першу чергу – електронів. Швидкі іони можуть далеко виходити за радіус

сепаратриси, оскільки внутрішнє магнітне поле FRC само по собі слабе (в середньому приблизно 0,03 Тл у порівнянні з 0,1 Тл зовнішнього поля в напрямку осі). Якщо густина нейтрального газу за межами сепаратриси буде занадто високою, швидкі іони будуть вразливими до втрат через обмін зарядами. Тому у FRC-системі 10 застосоване обладнання

5 для гетерування на стінках та інше обладнання (таке як плазмові гармати 350 і магнітні пробки 440, які, серед іншого, приймають участь у регулюванні потоку газу), призначене для мінімізування кількості зовнішніх нейтральних частинок і надання змоги належного нарощування струму швидких іонів.

Енжекція таблеток

10 [065] Коли в FRC 450 з підвищеною електронною температурою і більшим часом існування виникає достатня кількість швидких іонів, до FRC 450 з інжектора 700 таблеток впорскують заморожені таблетки Н або D для поповнення складу частинок у FRC 450. Проміжки часу передбаченої абляції занадто короткі, щоб утворити достатню для FRC кількість джерел частинок. Цей показник можна підвищити, збільшуючи площу поверхні впорскуваних шматочків

15 за рахунок подрібнення таблеток, коли вони знаходяться ще у трубках інжектора 700 таблеток, перед потраплянням до утримувальної камери 100; досягти цього результату можна підвищенням тертя між таблетками і інжекційними трубками, зменшуючи радіус вигину останнього сегмента інжекційної трубки прямо перед виходом до утримувальної камери 100. Змінюючи послідовність спрацювання і частку цих 12 стволів (інжекційних трубок), а також

20 ступінь фрагментації, можна налаштувати систему інжектування 700 таблеток на бажаний рівень поповнення запасу частинок. Це, в свою чергу, допомагає підтримувати внутрішній кінетичний тиск у FRC 450, а також стабільне функціонування і час існування FRC 450.

[066] Отримані через абляцію атоми, потрапивши у плазму в FRC 450, стають повністю іонізованими. Холодна плазма, що є результатом цього процесу, розігривається за рахунок зіткнень з власною плазмою FRC. Енергія, необхідна для підтримання бажаної температури FRC, поставляється головним чином інжекторами 600 пучків. В цьому сенсі інжектори 700 таблеток разом з інжекторами 600 нейтральних пучків утворюють систему підтримування

25 стаціонарного стану і "життєзабезпечення" FRC 450.

Сідлоподібні котушки

30 [067] Для досягнення сталого струму стаціонарного стану і підтримання потрібного іонного струму, бажано запобігти або значно зменшити прискорювання електронів через силу тертя електрон-іон (що виникає внаслідок передавання моменту іон-електрон). В FRC-системі 10 використана нова методика гальмування електронів за допомогою зовнішнього впливу полем статичного магнітного диполя або квадруполя. Це досягається за допомогою зовнішніх

35 сідлоподібних котушок 460, зображених на Фіг. 15. Радіальне магнітне поле від сідлоподібних котушок 460, прикладене перпендикулярно, індукує осьове електричне поле в плазмі, що обертається. Результируючий струм електронів в напрямку осі взаємодіє з радіальним магнітним полем, і це викликає в них азимутальну гальмівну силу $F_{\theta} = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$. Щоб забезпечити адекватне гальмування електронів в умовах, типових для FRC-системи 10, сила потрібного магнітного поля від диполя (або квадруполя) в середині плазми повинна мати порядок лише

40 0,001 Тл. Відповідне зовнішнє поле силою приблизно 0,015 Тл достатньо мале, щоб не спричинити помітних втрат швидких частинок або якимось інакше негативно вплинути на утримання плазми. Фактично прикладання магнітного поля, утворюваного магнітним диполем (або квадруполем), сприяє усуненню нестабільностей. В комбінації з інжекціями тангенціальних

45 пучків нейтральних частинок і осьовими інжекціями плазми сідлоподібні котушки 460 забезпечують додатковий рівень контролю стабільності у відношенні підтримування струму.

Магнітні пробки

[068] Конструкція імпульсних котушок 444 в складі магнітних пробок 440 дозволяє генерувати сильні локальні магнітні поля (2-4 Тл) з помірною (приблизно 100 кДж) енергією,

50 накопиченою конденсаторами. Для формування магнітних полів, типових для функціонування запропонованої FRC-системи 10, всі силові лінії всередині об'єму формування проходять крізь звуження 442 у місцях розташування магнітних пробок 440, як це показано силовими лініями магнітного поля на Фіг. 2, і плазма не контактує зі стінками. Крім того, магнітні пробки 440 в тандемі з магнітами 416 квазіпостійного струму диверторів можуть бути налаштовані так, щоб

55 спрямовувати силові лінії поля на електроди 910 дивертора або збирати силові лінії в гострі кінчики (не відображено), що покращує стабільність і пригнічує паралельну електронну теплопровідність.

[069] Магнітні пробки 440 як такі також вносять вклад в керування потоком нейтрального газу. Магнітні пробки 440 дозволяють краще утилізувати газоподібний дейтерій, доданий в

60 кварцові трубки під час формування FRC, оскільки перетікання газу в дивертори 300 значно

знижує низька газопровідність цих магнітних пробок (лише 500 л/с). Більшість доданого газу, який залишається у трубках 210 формування, швидко іонізується. До того ж, плазма високої густини, що тече через магнітні пробки 440, забезпечує ефективну іонізацію нейтральних частинок, а отже – ефективний газовий бар'єр. В результаті більшість нейтральних частинок, які

5 виносяться в дивертори 300 зовнішнім шаром 456 FRC, не повертаються до утримувальної камери 100. А ті нейтральні частинки, що пов'язані з роботою плазмових гармат 350 (як обговорюється нижче), в своїй більшості лишаються в диверторах 300.

[070] Зрештою, магнітні пробки 440 сприяють покращенню утримання частинок в зовнішньому шарі FRC. При дзеркальному відношенні (пробка/утримувальне магнітне поле) в

10 діапазоні від 20 до 40 і при 15 м відстані між північною і південною магнітними пробками 440, час $\tau_{||}$ утримання частинок зовнішнім шаром може зрости на порядок величини. Збільшення $\tau_{||}$ одразу підвищує утримання частинок в FRC.

[071] Припускаючи, що втрати частинок з ядра 453 сепаратриси через радіальну дифузію (D) знаходиться в рівновазі з осьовими втратами ($\tau_{||}$) через зовнішній шар 456, одержуємо

15 $(2\pi r_s L_s)(D n_s / \delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s / \tau_{||})$, звідси виходить, що величина градієнта густини сепаратриси може бути записана в такому вигляді $\delta = (D \tau_{||})^{1/2}$. Тут r_s , L_s і n_s – це радіус сепаратриси, довжина сепаратриси і густина сепаратриси, відповідно. Час утримання частинок в FRC становить $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(D n_s / \delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{||} \tau_{\perp})^{1/2}$, де $\tau_{\perp} = a^2 / D$ з заміною $a = r_s / 4$. У фізичному сенсі це означає, що збільшення $\tau_{||}$ призводить до зростання δ (зменшення градієнта густини

20 сепаратриси і параметра дрейфу), і, відповідно, зниження втрат частинок у FRC. Повне покращання утримання частинок в FRC в загальному випадку трохи менше, ніж квадратичне, оскільки n_s зростає разом з $\tau_{||}$.

[072] Для значного зростання $\tau_{||}$ потрібна також значна стабільність зовнішнього шару 456 (тобто відсутність $n=1$ жолобкових, шлангових або інших МГД-нестійкостей, типових для

25 відкритих систем). Застосування плазмових гармат 350 сприяє цій бажаній стабільності. В цьому сенсі магнітні пробки 440 і плазмові гармати 350 являють собою ефективну систему керування зовнішнім шаром.

Плазмові гармати

[073] Плазмові гармати 350 покращують стабільність кінцевих струменів 454 FRC через

30 лінійну зв'язність. Плазма, яку генерують плазмові гармати 350, не має азимутального кутового моменту, що виявляється корисним для керування ротаційною нестійкістю FRC. Як такі, гармати 350 є ефективним засобом керування стабільністю FRC, і відома технологія стабілізування за допомогою квадруполів стає непотрібною. Результатом є те, що плазмові гармати 350 дають змогу використати переваги корисного впливу швидких частинок або роблять можливим

35 встановлювати у FRC новий режим гібридної кінетики, розкритий в цьому описі. Отже, плазмові гармати 350 забезпечують можливість використовувати в роботі з FRC-системою 10 струми сідлоподібних котушок, цілком достатні для гальмування електронів, але такі, що не перевищують порогу, після якого могли б стати причиною нестабільності FRC та/або викликати критичну дифузію швидких частинок.

[074] Як було зазначено вище при обговоренні магнітних пробок, якщо вдасться значно збільшити $\tau_{||}$, швидкість постачання плазми плазмовими гарматами буде зіставною зі швидкістю

40 втрати частинок через зовнішній шар (приблизно 10^{22} s^{-1}). Час існування плазми, утвореної гарматами в FRC-системі 10, знаходиться в мілісекундному діапазоні. Дійсно, розглянемо гарматну плазму з густиною $n_e \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ та іонною температурою приблизно 200 еВ, утримувану

45 між кінцевими магнітними пробками 440. Довжина пастки L і дзеркальне відношення R дорівнюють 15 м і 20, відповідно. При кулоновому розсіянні довжина вільного пробігу іонів становить $\lambda_{ii} \approx 6 \times 10^3 \text{ cm}$ і, оскільки $\lambda_{ii} \ln R / R < L$, іони утримуються в газо-динамічному режимі. Час утримання плазми в цьому режимі приблизно дорівнює $\tau_{qd} \approx RL / 2V_s \approx 2 \text{ ms}$, де V_s – звукова швидкість іонів. Для порівняння, класичне значення часу утримання плазми з такими самими

50 параметрами становить $\tau_c \approx 0,5 \tau_{ii} (\ln R + (\ln R)^{0.5}) \approx 0,7 \text{ ms}$. Аномальна поперечна дифузія може, в принципі, скоротити час утримання плазми. Проте, якщо припустити, що в FRC-системі 10 має місце бомівська дифузія, то оціночний час поперечного утримання для гарматної плазми становитиме $\tau_{\perp} > \tau_{qd} \approx 2 \text{ ms}$. Тобто гармати забезпечуватимуть значне підзарядження зовнішнього шару 456 FRC, а отже і загальне покращання утримання частинок у FRC.

[075] Більше того, струмені плазми з гармати можуть бути включені від приблизно 150 мкс до приблизно 200 мкс, що дозволяє їх використання протягом запуску первинних FRC, їх перенесення і злиття в утримувальній камері 100. Включені в момент часу, близький до $t \approx 0$ (ініціювання головних батарей FRC), плазмові гармати допомагатимуть підтримувати запропоновану динамічно сформовану через злиття FRC 450. Об'єднані кількості частинок від

первинних FRC і гармат адекватні захопленню пучків нейтральних частинок, розігріванню плазми і тривалій стійкості. При включенні в інтервалі часу t від -1 мс до 0 мс, плазмові гармати можуть заповнити плазмою кварцові трубки 210 або іонізувати вдутий в кварцові трубки газ, дозволяючи таким чином формувати FRC при зниженій або можливо навіть нульовій кількості вдутого газу. Останнє може вимагати повністю холодного формування плазми для того, щоб дозволити швидку дифузію магнітного поля з оберненим зміщенням. Якщо момент включення $t < -2$ мс, струмені плазми зможуть заповнити від 1 м³ до 3 м³ об'єму силових магнітних ліній в ділянках формування і утримання секцій 200 формування і утримувальній камері 100 з густиною цієї плазми порядку 10^{13} см⁻³, достатньою, для збільшення пучків нейтральних частинок до з'явлення FRC. Після цього можуть бути створені первинні FRC і відправлені до камери остаточного утримання плазми. Таким чином, плазмові гармати 350 дозволяють одержати велику кількість робочих режимів з різноманітними умовами і параметрами.

Електричне зміщення

[076] Регулювання радіального профілю електричного поля в зовнішньому шарі 456 корисне для стабільності і утримання FRC з декількох різних точок зору. Завдяки новим відхилювальним компонентам, встановленим у FRC-системі 10, є змога впливати різними електричними потенціалами з детально спланованим розподілом на групу поверхонь незамкненого магнітного потоку в просторі всієї установки далеко зовні центральної зони утримання утримувальної камери 100. Цим способом можуть бути згенеровані радіальні електричні поля, що будуть перетинати зовнішній шар 456 лише зовні FRC 450. Ці радіальні електричні поля почнуть змінювати азимутальне обертання зовнішнього шару 456 і впливати на його утримання через $E \times B$ -складову швидкості. Будь-який диференціальний обертний рух між зовнішнім шаром 456 і ядром 453 FRC буде потім переданий всередину плазми FRC через зміщення. В результаті керування зовнішнім шаром 456 безпосередньо впливатиме на ядро 453 FRC. Крім цього, з огляду на те, що вільна енергія обертання плазми також може спричинити нестійкості, ця методика дає засоби безпосереднього контролювання раптової появи і зростання нестійкостей. В FRC-системі 10, відповідне зміщення зовнішнього шару дозволяє ефективно керувати перенесенням і обертанням незамкнених силових ліній магнітного поля, а також – обертанням ядра FRC. Розташування і форма різноманітних електродів 900, 905, 910 і 920 з різними і незалежними потенціалами дозволяють контролювати різні групи поверхонь 455 магнітного потоку. У такий спосіб можна реалізувати широкий набір електричних полів різної сили і конфігурації, кожне зі своїм характерним впливом на поведінку плазми.

[077] Найголовнішим в усій цій новій технології зміщення є той факт, що на поведінку ядра і зовнішнього шару плазми можна впливати зовсім зовні плазми FRC, тобто немає потреби у будь-яких фізичних компонентах, які контактували б з гарячою плазмою в центрі (що дуже серйозно відбилося б на енергії, магнітному потоці і втраті частинок). Це має великий позитивний вплив на продуктивність і всі потенційні застосування цієї концепції HPF.

Експериментальні дані – HPF-функціонування

[078] У встановленні HPF-режиму дуже важливу роль відіграє інжекція швидких частинок за допомогою інжекторів 600 нейтральних пучків. Фіг. 16 ілюструє цей факт. На ній відображений набір кривих, які показують, як час існування FRC корелює з тривалістю імпульсів. Всі інші умови функціонування зберігали постійними для всіх повторень експерименту в цьому дослідженні. Дані усереднювалися для великої кількості "пострілів", тому вони відображають типову поведінку. Чітко видно, що триваліші пучки народжують більш довговічні FRC. Ці спостереження, а також дані інших видів тестування з цього експерименту показують, що такі пучки підвищують стабільність і зменшують втрати. Кореляція між тривалістю імпульсів і часом існування FRC не є ідеальною, оскільки захоплення пучків втрачає ефективність нижче певного розміру плазми, тобто, якщо фізичні розміри FRC 450 поменшають, не всі інжектвані пучки перетнуться з нею і будуть захоплені. FRC стискається головним чином тому, що чиста енергія втрат (≈ 4 МВт), які мають місце в плазмі FRC в ході розряду при певних умовах експерименту, виявляється дещо більшою, ніж повна потужність ($\approx 2,5$ МВт), що подається в FRC цими нейтральними пучками. Наближення пучків до центра серединної площини камери 100 повинно призвести до зниження цих втрат і збільшення часу існування FRC.

[079] Фіг. 17 ілюструє вплив різних компонентів на досягнення HPF-режиму. На ній зображено сімейство типових кривих, що описують життєвий цикл FRC 450 в залежності від часу. В усіх випадках протягом всього експерименту інжектували пучки однакової невеликої потужності (приблизно 2,5 МВт). Кожна крива відповідає певній окремій комбінації компонентів. Наприклад, функціонування FRC-системи 10 за відсутності магнітних пробок 440, плазмових гармат 350 або систем гетерування 800 призводить до швидкого виникнення ротаційної нестійкості і зникнення топології FRC. Підключення лише магнітних пробок 440 відстрочує

виникнення нестійкості і поліпшує утримання частинок. Комбінування магнітних пробок 440 і плазмових гармат 350 ще сильніше знижує нестабільність і збільшує час існування FRC. Е, нарешті, додавання гетерування (в даному випадку – T_i) до гармат 350 і пробок 440 дає найкращі результати – одержана FRC є вільною від нестійкостей і демонструє найдовший час існування. З цього експериментального підтвердження видно, що повна комбінація компонентів дає найкращий ефект і забезпечує найбільш бажані умови для використання пучків.

[080] Як показано на Фіг. 1, нещодавно створений HPF-режим демонструє значне покращання з точки зору перенесення частинок. Фіг. 1 ілюструє різницю в часі утримання частинок FRC-системою 10 між тим, коли вона працює в звичайному режимі, і тим, коли вона працює в HPF-режимі. В порівнянні з іншими установками, в HPF-режимі цей показник покращується значно більше ніж в 5 разів. Крім того, Фіг. 1 деталізує в часі утримання частинок FRC-системою 10 порівняно з тією самою величиною у традиційних FRC-експериментах, що проводилися раніше. У порівнянні з іншими установками, HPF-режим FRC-системи 10 збільшив утримання від 5 і близько до 20 разів. Е останнє та найголовніше: природа масштабування утримання для FRC-системи 10 у HPF-режимі рішуче відрізняється від усіх попередніх вимірювань. До створення HPF-режиму FRC-системи 10 для прогнозування часу утримання в попередніх експериментах з FRC на основі даних виводилися різні емпіричні закони масштабування. Всі ці закони масштабування більше всього залежать від співвідношення R^2/ρ_i , де R – радіус нульового магнітного поля (приблизний вимір фізичних масштабів установки), а ρ_i – ларморівський радіус для іонів, оцінений за допомогою прикладання зовнішнього магнітного поля (приблизний вимір застосованого магнітного поля). З Фіг. 1 ясно, що досягти тривалого утримання в FRC можливо лише у великих установках та/або при сильних магнітних полях. Оперування з традиційною FRC-системою 10 у звичайному режимі (CR) має тенденцію до підпорядкування закономірностям, які показані на Фіг. 1. Однак HPF-режим значно кращий і демонструє, що набагато краще утримання може бути досягнуто без великих установок і магнітних полів великої сили. Що ще важливіше, з Фіг. 1 також ясно, що HPF-режим збільшує час утримання з меншими у порівнянні з CR-режимом розмірами плазми. Ті самі тенденції можна помітити щодо часів утримання потоку і енергії (що обговорюється нижче), які також зросли в FRC-системі 10 від 3 до 8 разів. Тому, завдяки прориву з HPF-режимом, достатньо застосовувати пучки не дуже великої потужності, магнітні поля меншої сили та розміру, щоб підживлювати і підтримувати рівновагу FRC в FRC-системі 10 і майбутніх установках з високими енергіями. Разом із цими удосконаленнями досягають більш низьких будівельних та експлуатаційних витрат, а також зниженої складності проектування.

[081] Для подальшого порівняння на Фіг. 18 показана залежність від часу даних репрезентативного HPF-режиму розряду в FRC-системі 10. Фіг. 18(a) відображає радіус виключеного потоку на серединній площині. Для цих довгих ліній існування згадані стінки з електропровідної сталі перестають бути таким вже добрим засобом зберігання потоку, тому до магнітних датчиків з внутрішнього боку стінок додані датчики зовні від них, щоб правильно враховувати дифузію магнітного потоку крізь сталь. Як показано на Фіг. 13, у порівнянні з типовим функціонуванням в звичайному режимі, час існування в HPF-режимі становить більше 400 %.

[082] Репрезентативний графік лінійно проінтегрованої густини зображений на Фіг. 18(b), з доповненням у вигляді контурів абелевої інверсії густини на Фіг. 18(c). У порівнянні із звичайним режимом FRC, якому відповідає зображення на Фіг. 13, стан плазми протягом всього імпульсу значно спокійніший, що є показником дуже стабільних процесів. Пікове значення густини також трохи нижче у HPF-пострілах – це є результатом більш високої загальної температури плазми (до 2 разів), як це видно з Фіг. 18(d).

[083] Для розрядів, що відповідають графікам з Фіг. 18, час утримання енергії, частинок і потоку становить 0,5 мс, 1 мс і 1 мс, відповідно. У момент часу 1 мс після розряду накопичена енергія плазми становить 2 кДж, тоді як втрати становлять приблизно 4 МВт, що робить її дуже підходящою мішенню для підтримувальних нейтральних пучків.

[084] На Фіг. 19 підсумовані всі переваги HPF-режиму у вигляді, до якого призводить нещодавно створене експериментальне масштабування утримання HPF-потоку. Як видно з Фіг. 19, яка відображає вимірювання, виконані до і після $t=0,5$ мс (тобто $t<0,5$ мс і $t>0,5$ мс), утримання вимірюють, з грубим оцінюванням, квадратом електронної температури. Це значне масштабування з позитивним степенем T_e (на відміну від негативного) є повною протилежністю тому, що демонструють традиційні токомаки, у яких утримання зазвичай обернено пропорційно якому-небудь степеню електронної температури. Прояв такого співвідношення є прямим результатом HPF-стану і великих орбіт (тобто орбіт, порівнюваних з масштабами топології FRC та/або принаймні з характерним значенням градієнта магнітного поля) іонного вмісту. По суті, ці

нові масштаби істотно сприяють високим робочим температурам і відкривають шлях до реакторів з відносно невеликими розмірами.

[085] Хоча запропонований винахід допускає різні модифікації та альтернативні форми, на фігурах показані і в цьому описі детально охарактеризовані конкретні приклади винаходу. Проте, слід мати на увазі, що цей винахід не обмежений такими конкретними формами або способами, навпроти, він охоплює всі змінені, еквівалентні та альтернативні варіанти здійснення, які відповідають суті та об'єму, визначеного прикладеною формулою винаходу.

[086] У наведеному вище описі конкретна термінологія приведена лише з пояснювальною метою, щоб забезпечити повне розуміння цього винаходу. Однак слід мати на увазі, що фахівцю у цій галузі зрозуміло, що ці конкретні подробиці не є необхідними для задля розуміння описаного винаходу.

[087] Різні ознаки наведених типових прикладів і залежних пунктів формули винаходу можуть бути скомбіновані в такі способи, які не були конкретно і в явній формі перелічені, щоб створити додаткові корисні варіанти здійснення викладених ідей. Також очевидно, що всі діапазони величин або позначення груп сутностей мають на увазі всі проміжні величини або сутності, які включені в цей опис так, як коли б вони були окремо вказані в цьому описі, а також для визначення меж заявленого винаходу.

[088] У цьому описі розкриті системи і способи генерування і підтримування HPF-режиму FRC. Слід мати на увазі, що розкриті в цьому описі варіанти здійснення винаходу наведені лише з метою тлумачення і не повинні розглядатися як такі, що обмежують обсяг цього винаходу. Будь-які модифікації, застосування, заміни, комбінації, удосконалення та способи виробництва без виходу за обсяг або без відходу від суті цього винаходу можуть бути зрозумілими для фахівця в цій галузі. Наприклад, читачеві має бути зрозуміло, що конкретний порядок і поєднання технологічних дій, розкритих в цьому описі, є просто ілюстративним, якщо не вказано інше, і запропонований винахід може бути реалізований із застосуванням інших або додаткових технологічних дій, або інших комбінацій або порядку виконання технологічних дій. Як інший приклад, кожна ознака одного варіанта здійснення винаходу може бути скомбінована і узгоджена з іншими ознаками, наведеними в інших варіантах здійснення винаходу. Ознаки та способи, відомі фахівцям, також можуть бути включені до цього опису за бажанням. Крім того, безумовно, ознаки за бажанням можуть бути додані або виключені. Відповідно, цей винахід не може бути обмежений, окрім як змістом прикладених пунктів Формули та їх еквівалентів.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Система для генерування та підтримування магнітного поля, яке має конфігурацію з оберненим полем (FRC), яка включає в себе:
утримувальну камеру,
першу та другу діаметрально протилежні секції формування FRC, зв'язані з утримувальною камерою, при цьому згадані секції формування включають в себе модульні системи формування для генерування FRC і перенесення їх в напрямку серединної площини утримувальної камери,
перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою секціями формування,
першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами,
першою і другою секціями формування і утримувальною камерою,
множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з утримувальною камерою і зорієнтованих перпендикулярно до осі утримувальної камери,
магнітну систему, зв'язану з утримувальною камерою, першою і другою секціями формування та першим і другим диверторами, при цьому згадана магнітна система включає в себе першу і другу магнітні пробки, розташовані між згаданими першою і другою секціями формування та першим і другим диверторами,
систему генерування, зв'язану з утримувальною камерою та першим і другим диверторами, один або більше електрод(ів) зміщення для електричного зміщення поверхонь незамкненого потоку згенерованої FRC, при цьому згадані один або більше електрод(ів) зміщення розташований(і) всередині одного або декількох з таких елементів: утримувальна камера, перша і друга секція формування та перший і другий дивертори,
дві або більше сідлоподібні(их) котушки(ок), зв'язані(их) з утримувальною камерою, і інжектор іонних таблеток, зв'язаний з утримувальною камерою.
2. Система за п. 1, яка **відрізняється** тим, що виконана для роботи під вакуумом, коли базовий тиск становить близько 10^{-8} торр (133×10^{-8} Па) або менше.

3. Система за п. 1, яка **відрізняється** тим, що магнітна система включає в себе множину котушок квазіпостійного струму, рознесених на певну відстань вздовж осі утримувальної камери, першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.
4. Система за п. 3, яка **відрізняється** тим, що магнітна система також включає в себе першу
5 групу пробочних котушок, розміщених між кінцями утримувальної камери і першою і другою секціями формування.
5. Система за п. 4, яка **відрізняється** тим, що магнітна пробка включає в себе другу групу пробочних котушок між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.
- 10 6. Система за п. 5, яка **відрізняється** тим, що магнітна пробка також включає в себе групу котушок магнітної пробки, обгорнутих навколо звужень у проходах між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.
7. Система за п. 6, яка **відрізняється** тим, що котушки магнітної пробки являють собою компактні імпульсні пробочні котушки.
- 15 8. Система за п. 1, яка **відрізняється** тим, що перша і друга секції формування включають в себе видовжену трубку.
9. Система за п. 8, яка **відрізняється** тим, що видовжена трубка являє собою кварцову трубку з облицюванням.
10. Система за п. 9, яка **відрізняється** тим, що облицювання утворене з надчистого кварцу.
- 20 11. Система за п. 8, яка **відрізняється** тим, що системи формування є системами формування з імпульсним живленням.
12. Система за п. 8, яка **відрізняється** тим, що системи формування включають в себе множину блоків живлення і керування, кожен з яких зв'язаний зі своєю одною з множини обойм, щоб живити групу котушок цієї обойми, однієї з множини обойм, що оточують видовжені трубки першої і другої секцій формування.
- 25 13. Система за п. 12, яка **відрізняється** тим, що кожен окремий блок з множини блоків живлення і керування включає в себе систему запуску і керування.
14. Система за п. 13, яка **відрізняється** тим, що системи запуску і керування кожного окремого блока з множини блоків живлення і керування є синхронізованими для забезпечення можливості статичного формування FRC, коли FRC формують, а вже потім передають, або динамічного формування FRC, коли FRC формують і передають одночасно.
- 30 15. Система за п. 1, яка **відрізняється** тим, що множина інжекторів пучків нейтральних атомів включає в себе один або декілька інжекторів пучків нейтральних атомів на основі ВЧ джерела плазми та один або декілька інжекторів пучків нейтральних атомів з джерелом на основі дугового розряду.
- 35 16. Система за п. 1, яка **відрізняється** тим, що множина інжекторів пучків нейтральних атомів зорієнтовані так, щоб лінії їх інжекцій були тангенціальними відносно FRC, і бажана зона захоплення знаходилася цілком в межах сепаратиси FRC.
17. Система за п. 16, яка **відрізняється** тим, що інжектор таблеток являє собою 12-ствольний
40 інжектор таблеток, зв'язаний з утримувальною камерою і зорієнтований у напрямку іонних таблеток в FRC.
18. Система за п. 1, яка **відрізняється** тим, що система гетерування включає в себе одну або більше систем осаджування титану і систем осаджування літію, які створюють покриття поверхонь з боку плазми в утримувальній камері та першому і другому диверторах.
- 45 19. Система за п. 18, яка **відрізняється** тим, що системи осаджування застосовують технології нанесення покриття осадженням з парової фази.
20. Система за п. 18, яка **відрізняється** тим, що система осаджування літію включає в себе множину атомарних печей з напрямними соплами.
21. Система за п. 18, яка **відрізняється** тим, що система осаджування титану включає в себе
50 множину твердих кульок, що підігріваються в напрямному кожусі.
22. Система за п. 1, яка **відрізняється** тим, що електроди зміщення включають одне або більше з такого: один або більше точковий(их) електрод(ів), розміщений(их) всередині утримувальної камери для контакту з незамкненими силовими лініями; група кільцевих електродів між утримувальною камерою та першою і другою секціями формування для заряджання найдальших від центра шарів магнітного потоку в азимутально-симетричний спосіб;
55 множина зібраних в концентричний стек електродів, встановлених у першому і другому диверторах для заряджання множини концентричних шарів потоку, і аноди плазмових гармат для перехоплення незамкненого потоку.
23. Система для генерування та підтримування магнітного поля, яке має конфігурацію з
60 оберненим полем (FRC), яка включає в себе:

- утримувальну камеру,
першу і другу діаметрально протилежні секції формування FRC, зв'язані з утримувальною камерою,
перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою секціями формування,
- 5 першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами, першою і другою секціями формування та утримувальною камерою,
множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з утримувальною камерою і зорієнтованих перпендикулярно до осі утримувальної камери, і
магнітну систему, зв'язану з утримувальною камерою, першою і другою секціями формування та
- 10 першим і другим диверторами, при цьому згадана магнітна система включає в себе першу і другу магнітні пробки, розташовані між першою і другою секціями формування та першим і другим диверторами.
24. Система за п. 23, яка відрізняється тим, що магнітна система включає в себе множину котушок квазіпостійного струму, рознесених на певну відстань вздовж осі утримувальної камери, першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.
- 15 25. Система за п. 24, яка відрізняється тим, що магнітна система також включає в себе першу групу пробочних котушок, розміщених між кінцями утримувальної камери і першою і другою секціями формування.
26. Система за п. 25, яка відрізняється тим, що магнітна пробка включає в себе другу групу пробочних котушок між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.
- 20 27. Система за п. 26, яка відрізняється тим, що магнітна пробка також включає в себе групу котушок магнітної пробки, обгорнутих навколо звужень у проходах між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.
- 25 28. Система за п. 27, яка відрізняється тим, що котушки магнітної пробки являють собою компактні імпульсні пробочні котушки.
29. Система за п. 23, яка також включає в себе систему гетерування, зв'язану з утримувальною камерою та першим і другим диверторами.
30. Система за п. 23, яка також включає в себе один або більше електродів зміщення для електричного зміщення поверхонь незамкненого потоку згенерованої FRC, один або більше електрод(ів) зміщення, розташований(их) всередині одного або декількох з таких елементів: утримувальна камера, перша і друга секції формування та перший і другий дивертори.
- 30 31. Система за п. 23, яка також включає в себе дві або більше сідлоподібні(их) котушки(ок), зв'язані(их) з утримувальною камерою.
- 35 32. Система за п. 23, яка включає в себе інжектор іонних таблеток, зв'язаний з утримувальною камерою.
33. Система за п. 23, яка відрізняється тим, що секція формування включає в себе модульні системи формування для генерування FRC і перенесення її в напрямку серединної площини утримувальної камери.
- 40 34. Система для генерування та підтримування магнітного поля, яке має конфігурацію з оберненим полем (FRC), яка включає в себе утримувальну камеру,
першу та другу діаметрально протилежні секції формування FRC, зв'язані з утримувальною камерою,
перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою секціями формування,
- 45 множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з утримувальною камерою і зорієнтованих перпендикулярно до осі утримувальної камери,
магнітну систему, зв'язану з утримувальною камерою, першою і другою секціями формування та першим і другим диверторами, і
- 50 один або більше електрод(ів) зміщення для електричного зміщення поверхонь незамкненого потоку згенерованої FRC, при цьому згадані один або більше електрод(ів) зміщення розташований(і) всередині одного або більше з такого: утримувальна камера, перша і друга секції формування та перший і другий дивертори.
- 55 35. Система за п. 34, яка відрізняється тим, що електроди зміщення включають одне або більше з такого: один або більше точковий(их) електрод(ів), розміщений(их) всередині утримувальної камери для контакту з незамкненими силовими лініями; група кільцевих електродів між утримувальною камерою та першою і другою секціями формування для заряджання найдаальших від центра шарів магнітного потоку в азимутально-симетричний спосіб; множина зібраних в концентричний стек електродів, встановлених у першому і другому диверторах для

заряджання множини концентричних шарів потоку, і аноди плазмових гармат для перехоплення незамкненого потоку.

36. Система за п. 34, яка **відрізняється** тим, що магнітна система включає в себе множини котушок квазіпостійного струму, рознесених на певну відстань вздовж осі утримувальної камери, першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

37. Система за п. 36, яка **відрізняється** тим, що магнітна система також включає в себе першу групу пробочних котушок, розміщених між кінцями утримувальної камери та першою і другою секціями формування.

38. Система за п. 37, яка **відрізняється** тим, що магнітна система також включає в себе першу і другу магнітні пробки, при цьому перша і друга групи магнітних пробочок включають в себе другу групу пробочних котушок між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

39. Система за п. 38, яка **відрізняється** тим, що перша і друга магнітні пробки також включають в себе групу котушок магнітних пробочок, обгорнутих навколо звужень у проходах між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

40. Система за п. 39, яка **відрізняється** тим, що котушки магнітної пробки являють собою компактні імпульсні пробочні котушки.

41. Система за п. 34, яка **відрізняється** тим, що перша і друга секції формування включають в себе видовжену кварцову трубку.

42. Система за п. 41, яка **відрізняється** тим, що кожна секція формування включає в себе систему формування з імпульсним живленням, зв'язану з кварцовою трубкою.

43. Система за п. 42, яка **відрізняється** тим, що системи формування включають в себе множини блоків живлення і керування, кожен з яких зв'язаний зі своєю одною з множини обойм, щоб живити групу котушок цієї обойми, однієї з множини обойм, що оточують видовжені трубки першої і другої секцій формування.

44. Система за п. 43, яка **відрізняється** тим, що кожен окремий блок з множини блоків живлення і керування включає в себе систему запуску і керування.

45. Система за п. 44, яка **відрізняється** тим, що системи запуску і керування кожного окремого блока з множини блоків живлення і керування є синхронізованими для забезпечення можливості статичного формування FRC, коли FRC формують, а вже потім передають, або динамічного формування FRC, коли FRC формують і передають одночасно.

46. Система за п. 34, яка **відрізняється** тим, що множина інжекторів пучків нейтральних атомів зорієнтовані так, щоб лінії їх інжекцій були тангенціальними відносно FRC, і бажана зона захоплення знаходилася цілком в межах сепаратиси FRC.

47. Система за п. 34, яка також включає в себе інжектор іонних таблеток, зв'язаний з утримувальною камерою.

48. Система за п. 34, яка також включає в себе дві або більше сідлоподібні(их) котушки(ок), зв'язані(их) з утримувальною камерою.

49. Система за п. 34, яка також включає в себе систему гетерування, зв'язану з утримувальною камерою та першим і другим диверторами.

50. Система за п. 34, яка також включає в себе першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами, першою і другою секціями формування та утримувальною камерою.

51. Система для генерування та підтримування магнітного поля, яке має конфігурацію з оберненим полем (FRC), яка включає в себе:

утримувальну камеру,
першу і другу діаметрально протилежні секції формування FRC, зв'язані з утримувальною камерою,

перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою секціями формування,

першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами, першою і другою секціями формування та утримувальною камерою,

множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з утримувальною камерою і зорієнтованих перпендикулярно до осі утримувальної камери, і

магнітну систему, зв'язану з утримувальною камерою, першою і другою секціями формування та першим і другим диверторами.

52. Система за п. 51, яка відрізняється тим, що кожна з першої і другої секцій формування включає в себе видовжену трубку і систему формування з імпульсним живленням, зв'язану з видовженою трубкою.

53. Система за п. 52, яка відрізняється тим, що системи формування включають в себе множини блоків живлення і керування, кожен з яких зв'язаний зі своєю одною з множини обойм, щоб

живити групу котушок цієї обойми, однієї з множини обойм, що оточують видовжені трубки першої і другої секцій формування.

54. Система за п. 53, яка відрізняється тим, що кожен окремий блок з множини блоків живлення і керування включає в себе систему запуску і керування.

5 55. Система за п. 51, яка також включає в себе один або більше електрод(ів) зміщення для електричного зміщення поверхонь незамкненого потоку згенерованої FRC.

56. Система за п. 55, яка відрізняється тим, що один або більше електрод(ів) зміщення включає(ють) одне або більше з такого: один або більше точковий(их) електрод(ів), розміщений(их) всередині утримувальної камери для контакту з незамкненими силовими
10 лініями; група кільцевих електродів між утримувальною камерою та першою і другою секціями формування для заряджання найдавших від центра шарів магнітного потоку в азимутально-симетричний спосіб; множина зібраних в концентричний стек електродів, встановлених у першому і другому диверторах для заряджання множини концентричних шарів потоку, і аноди плазмових гармат для перехоплення незамкненого потоку.

15 57. Система за п. 51, яка відрізняється тим, що магнітна система включає в себе множину котушок квазіпостійного струму, рознесених на певну відстань вздовж осі утримувальної камери, першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів, і першу групу пробочних котушок, розміщених між кінцями утримувальної камери та першою і другою секціями формування.

20 58. Система за п. 57, яка відрізняється тим, що магнітна система також включає в себе першу і другу магнітні пробки, які включають в себе другу групу пробочних котушок, розміщену між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

59. Система за п. 58, яка відрізняється тим, що магнітні пробки також включають в себе групу компактних імпульсних котушок магнітних пробок, обгорнутих навколо звужень у проходах між
25 кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

60. Система за п. 51, яка відрізняється тим, що множина інжекторів пучків нейтральних атомів зорієнтовані так, щоб лінії їх інжекцій були тангенціальними відносно FRC, і бажана зона захоплення знаходилася цілком в межах сепаратрисы FRC.

30 61. Система за п. 51, яка також включає в себе інжектор іонних таблеток, зв'язаний з утримувальною камерою.

62. Система за п. 51, яка також включає в себе дві або більше сідлоподібні(их) котушки(ок), зв'язані(их) з утримувальною камерою.

35 63. Система за п. 51, яка також включає в себе систему гетерування, виконану так, щоб вкривати поверхні з боку плазми в утримувальній камері та першому і другому диверторах шаром гетерувального матеріалу.

64. Система для генерування та підтримування магнітного поля, яке має конфігурацію з оберненим полем (FRC), яка включає в себе утримувальну камеру,

40 першу та другу діаметрально протилежні секції формування FRC, зв'язані з утримувальною камерою,

перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою секціями формування, множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з утримувальною камерою і зорієнтованих перпендикулярно до осі утримувальної камери,

45 магнітну систему, зв'язану з утримувальною камерою, першою і другою секціями формування та першим і другим диверторами, і систему гетерування, виконану так, щоб вкривати поверхні з боку плазми в утримувальній камері та першому і другому диверторах шаром гетерувального матеріалу.

50 65. Система за п. 64, яка відрізняється тим, що система гетерування включає в себе одну або більше із систем осаджування титану і систем осаджування літію, які створюють покриття поверхонь з боку плазми в утримувальній камері та першому і другому диверторах.

66. Система за п. 65, яка відрізняється тим, що в системах осаджування застосовані технології нанесення покриття осадженням з парової фази.

67. Система за п. 65, яка відрізняється тим, що система осаджування літію включає в себе множину атомарних печей з напрямними соплами.

55 68. Система за п. 65, яка відрізняється тим, що система осаджування титану включає в себе множину твердих кульок, що підігріваються в напрямному кожусі.

69. Система за п. 64, яка також включає в себе першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами, першою і другою секціями формування та утримувальною камерою.

70. Система за п. 64, яка **відрізняється** тим, що кожна з першої і другої секцій формування включає в себе видовжену трубку і систему формування з імпульсним живленням, зв'язану з цією видовженою трубкою.

5 71. Система за п. 70, яка **відрізняється** тим, що системи формування включають в себе множини блоків живлення і керування, кожен з яких зв'язаний зі своєю одною з множини обойм, щоб живити групу котушок цієї обойми, однієї з множини обойм, що оточують видовжені трубки першої і другої секцій формування.

72. Система за п. 64, яка також включає в себе один або більше електрод(ів) зміщення для електричного зміщення поверхонь незамкненого потоку згенерованої FRC.

10 73. Система за п. 72, яка **відрізняється** тим, що один або більше електрод(ів) зміщення включає(ють) одне або більше з такого: один або більше точковий(их) електрод(ів), розміщений(их) всередині утримувальної камери для контакту з незамкненими силовими лініями; група кільцевих електродів між утримувальною камерою та першою і другою секціями формування для заряджання найдаальших від центра шарів магнітного потоку в азимутально-симетричний спосіб; множина зібраних в концентричний стек електродів, встановлених у

15 першому і другому диверторах для заряджання множини концентричних шарів потоку, і аноди плазмових гармат для перехоплення незамкненого потоку.

74. Система за п. 64, яка **відрізняється** тим, що магнітна система включає в себе множини котушок квазіпостійного струму, рознесених на певну відстань вздовж осі утримувальної камери,

20 першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів, першу групу пробочних котушок, розміщених між кінцями утримувальної камери та першою і другою секціями формування та другу групу пробочних котушок між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

75. Система за п. 64, яка також включає в себе групу компактних імпульсних пробочних котушок, обгорнутих навколо звужень у проходах між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

76. Система для генерування та підтримування магнітного поля, яке має конфігурацію з оберненим полем (FRC), яка включає в себе:

утримувальну камеру,

30 першу та другу діаметрально протилежні секції формування FRC, зв'язані з утримувальною камерою,

перший і другий дивертори, зв'язані з першою і другою секціями формування,

множину інжекторів пучків нейтральних атомів, зв'язаних з утримувальною камерою і зорієнтованих перпендикулярно до осі утримувальної камери, і

35 магнітну систему, зв'язану з утримувальною камерою, першою і другою секціями формування та першим і другим диверторами, при цьому магнітна система включає в себе дві або більше сідлоподібні(их) котушки(ок), зв'язані(их) з утримувальною камерою з кожного боку від серединної площини утримувальної камери.

77. Система за п. 76, яка також включає в себе першу і другу осьові плазмові гармати, функціонально зв'язані з першим і другим диверторами, першою і другою секціями формування

40 і утримувальною камерою.

78. Система за п. 76, яка відрізняється тим, що кожна з першої і другої секцій формування включає в себе видовжену трубку і систему формування з імпульсним живленням, зв'язану з цією видовженою трубкою.

45 79. Система за п. 76, яка також включає в себе один або більше електрод(ів) зміщення для електричного зміщення поверхонь незамкненого потоку згенерованої FRC.

80. Система за п. 79, яка відрізняється тим, що один або більше електрод(ів) зміщення включає(ють) одне або більше з такого: один або більше точковий(их) електрод(ів), розміщений(их) всередині утримувальної камери для контакту з незамкненими силовими

50 лініями; група кільцевих електродів між утримувальною камерою та першою і другою секціями формування для заряджання найдаальших від центра шарів магнітного потоку в азимутально-симетричний спосіб; множина зібраних в концентричний стек електродів, встановлених у першому і другому диверторах для заряджання множини концентричних шарів потоку, і аноди плазмових гармат для перехоплення незамкненого потоку.

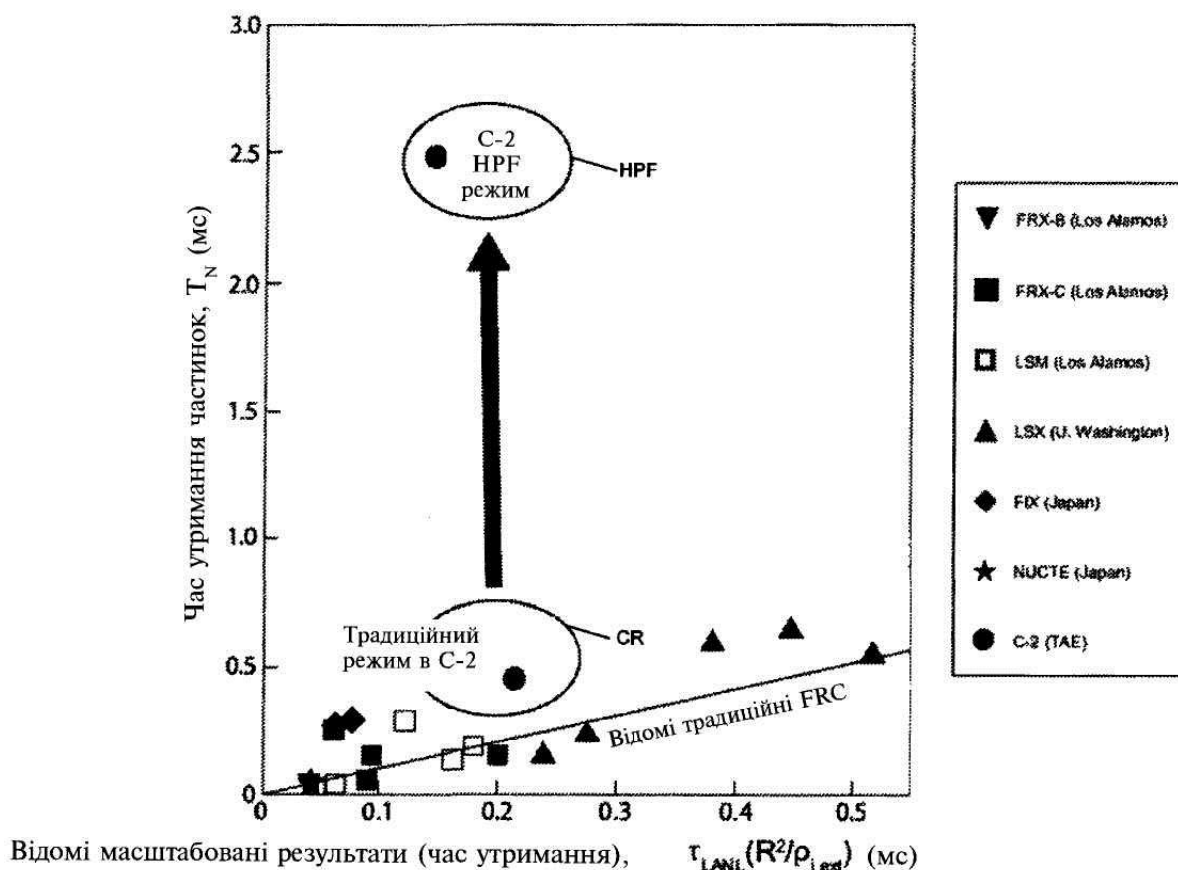
81. Система за п. 76, яка відрізняється тим, що магнітна система включає в себе множини котушок квазіпостійного струму, рознесених на певну відстань вздовж осі утримувальної камери,

55 першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів, першу групу пробочних котушок, розміщених між кінцями утримувальної камери і першою і другою секціями формування, і другу групу пробочних котушок між кожною(им) з першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

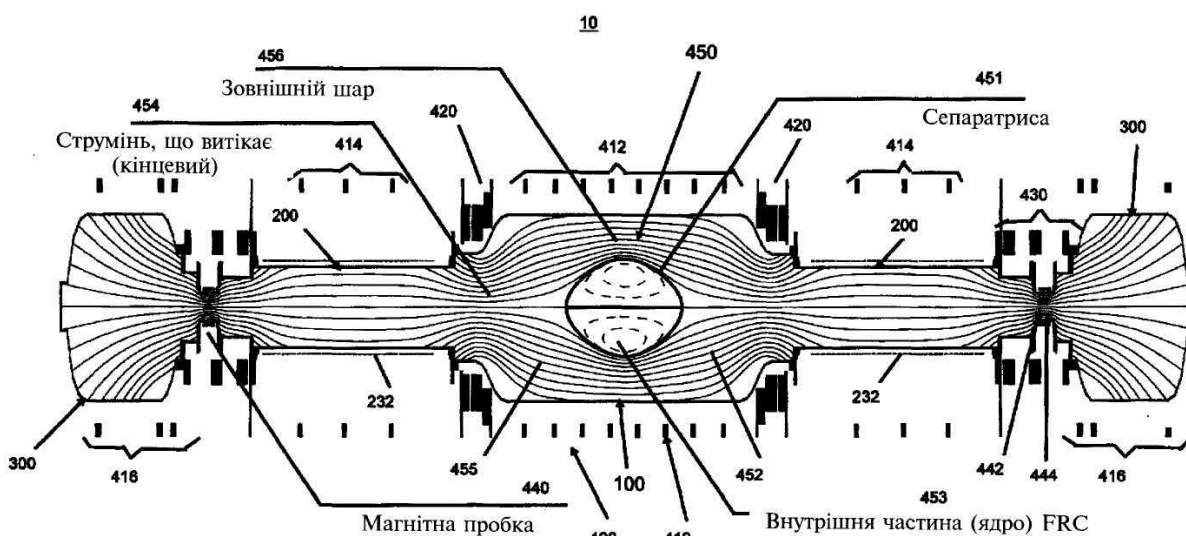
60

82. Система за п. 81, яка також включає в себе групу компактних імпульсних пробочних котушок, обгорнутих навколо звужень у проходах між кожною(им) зі згаданих першої і другої секцій формування та першого і другого диверторів.

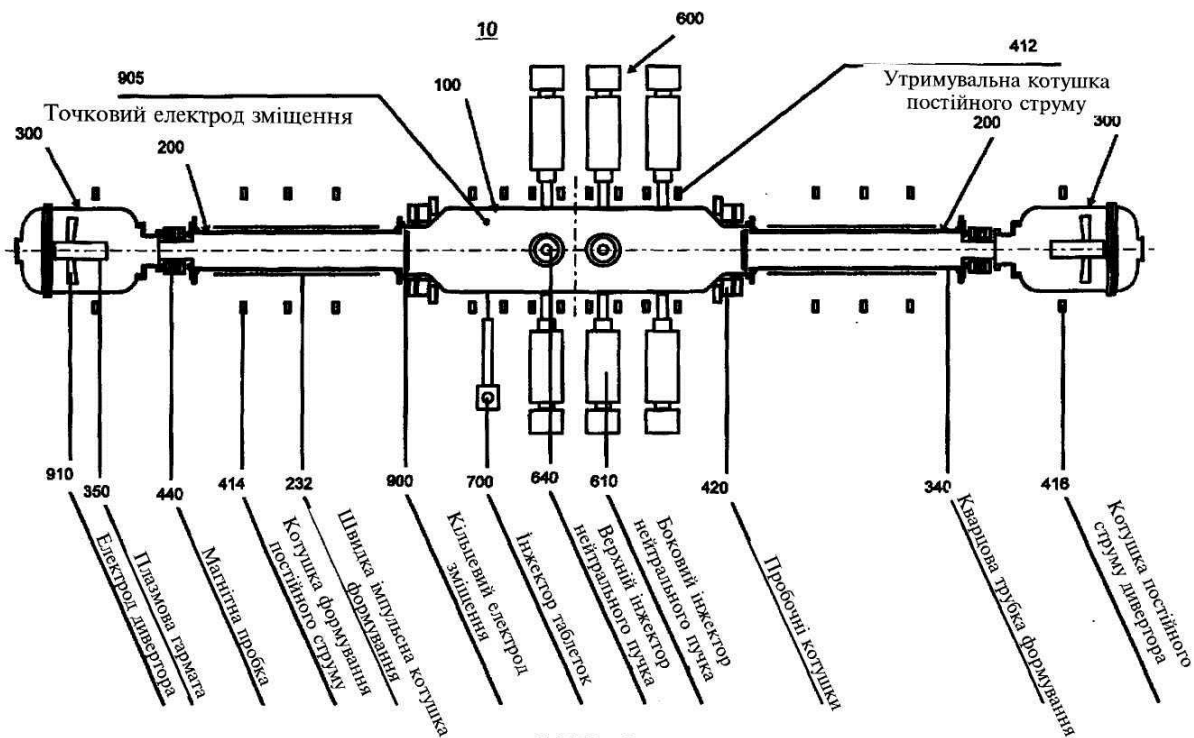
83. Система за п. 78, яка **відрізняється** тим, що видовжена трубка являє собою кварцову трубку.



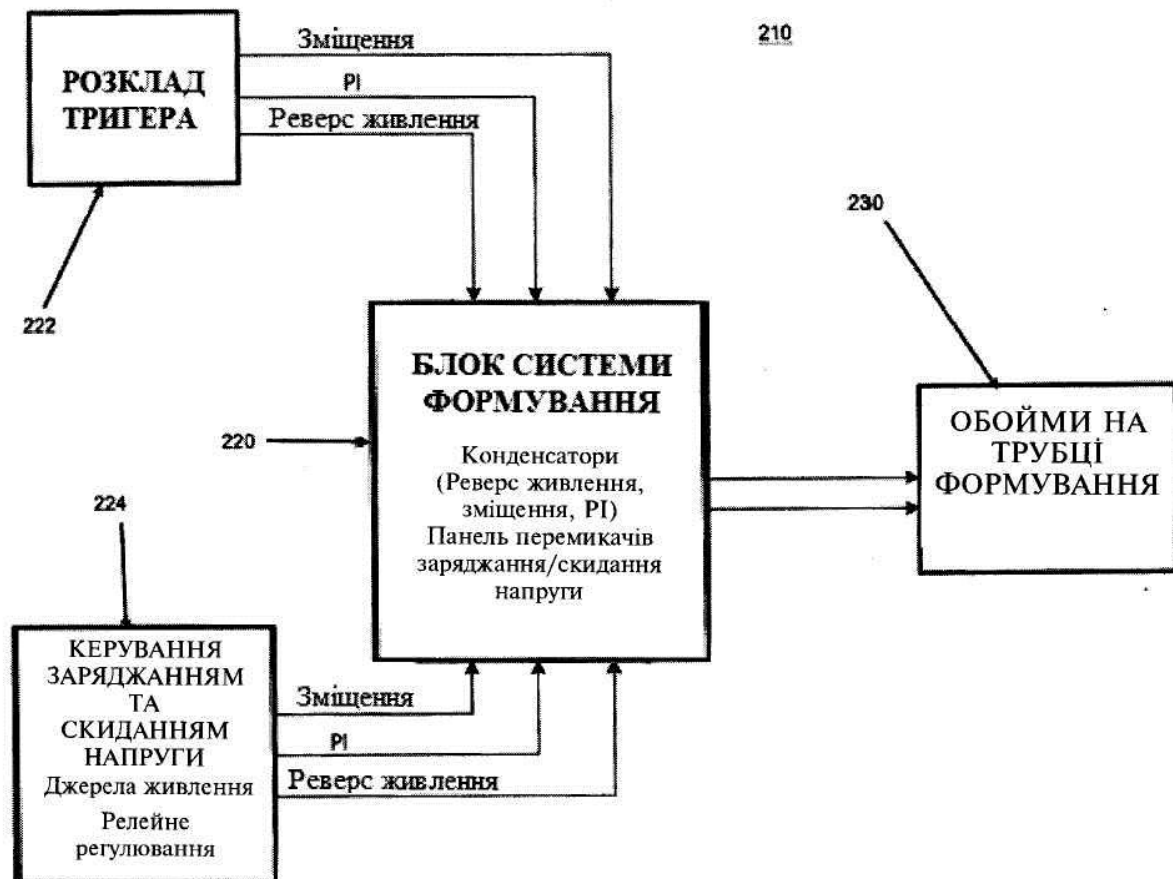
ФІГ. 1



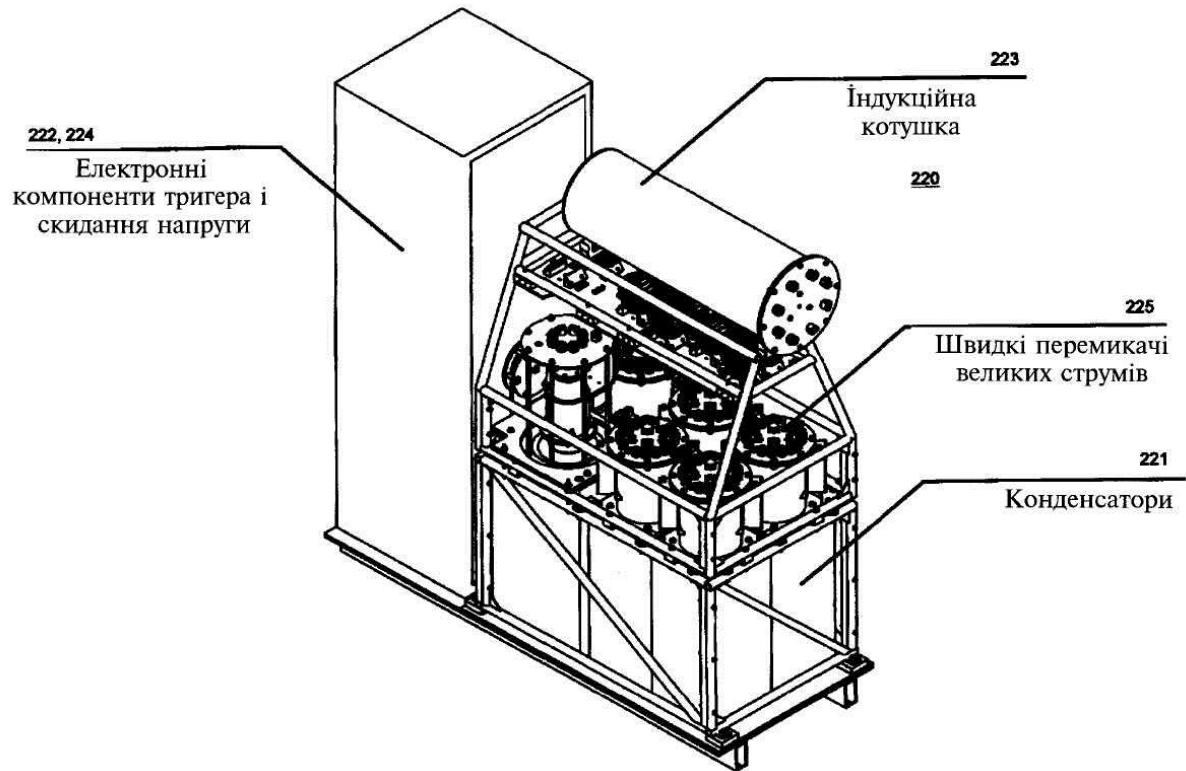
ФІГ. 2



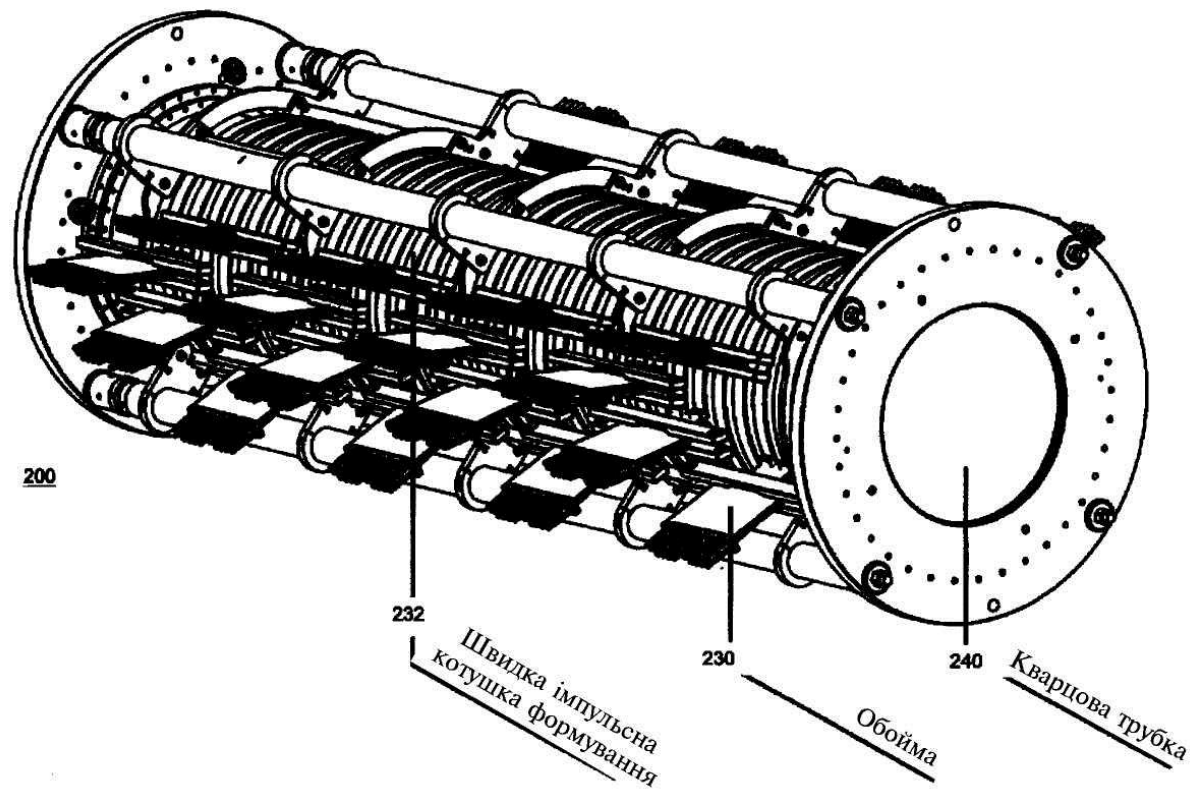
ФІГ. 3



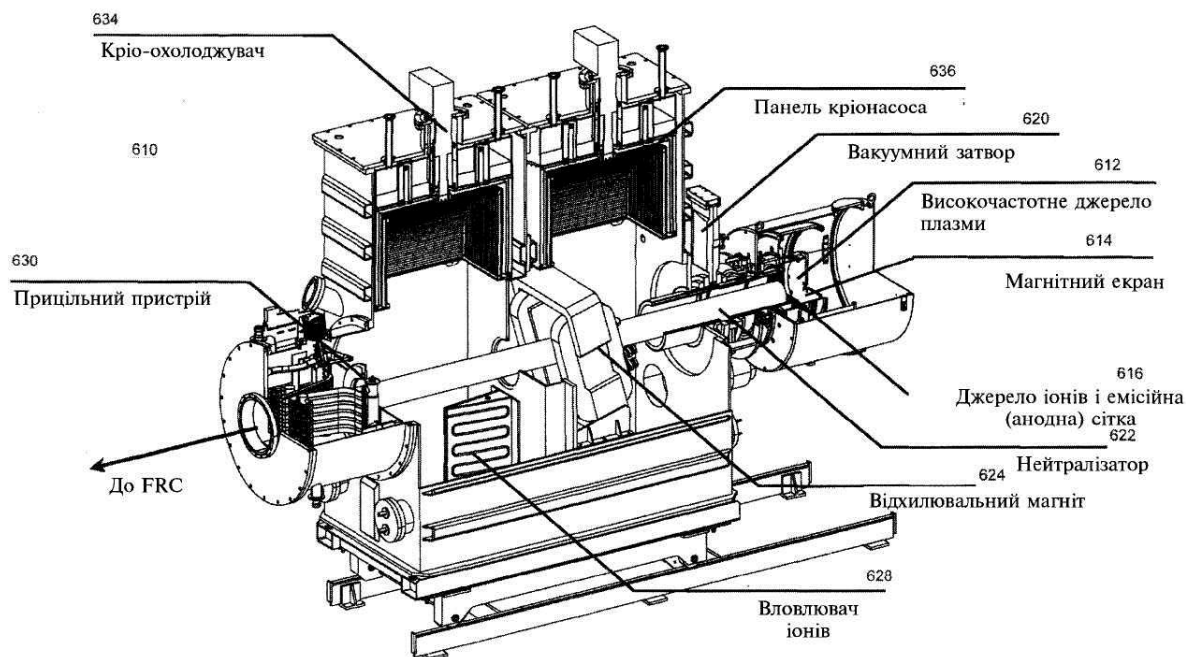
ФІГ. 4



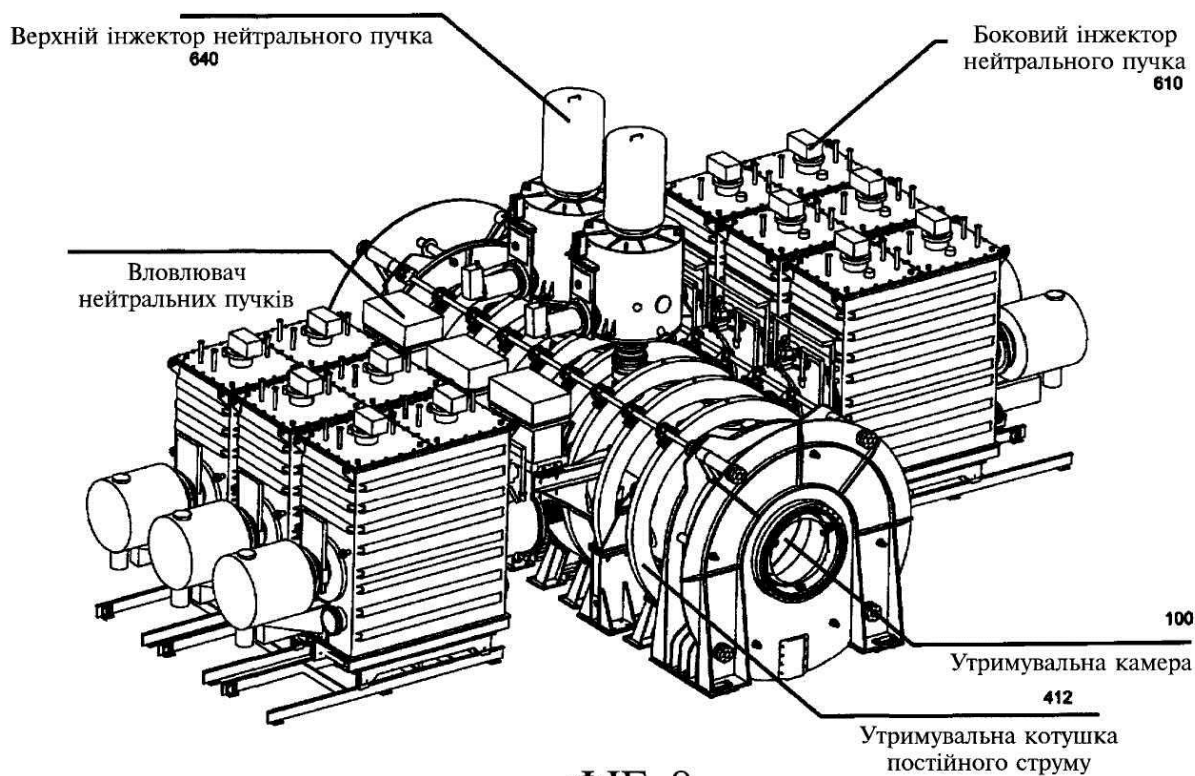
ФІГ. 5



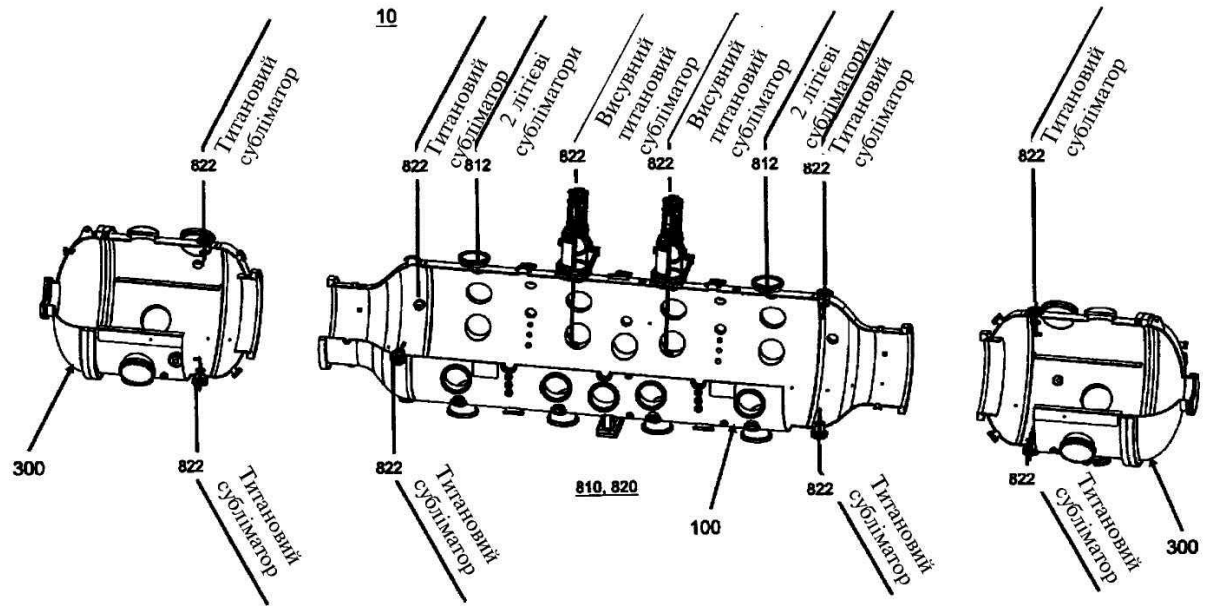
ФІГ. 6



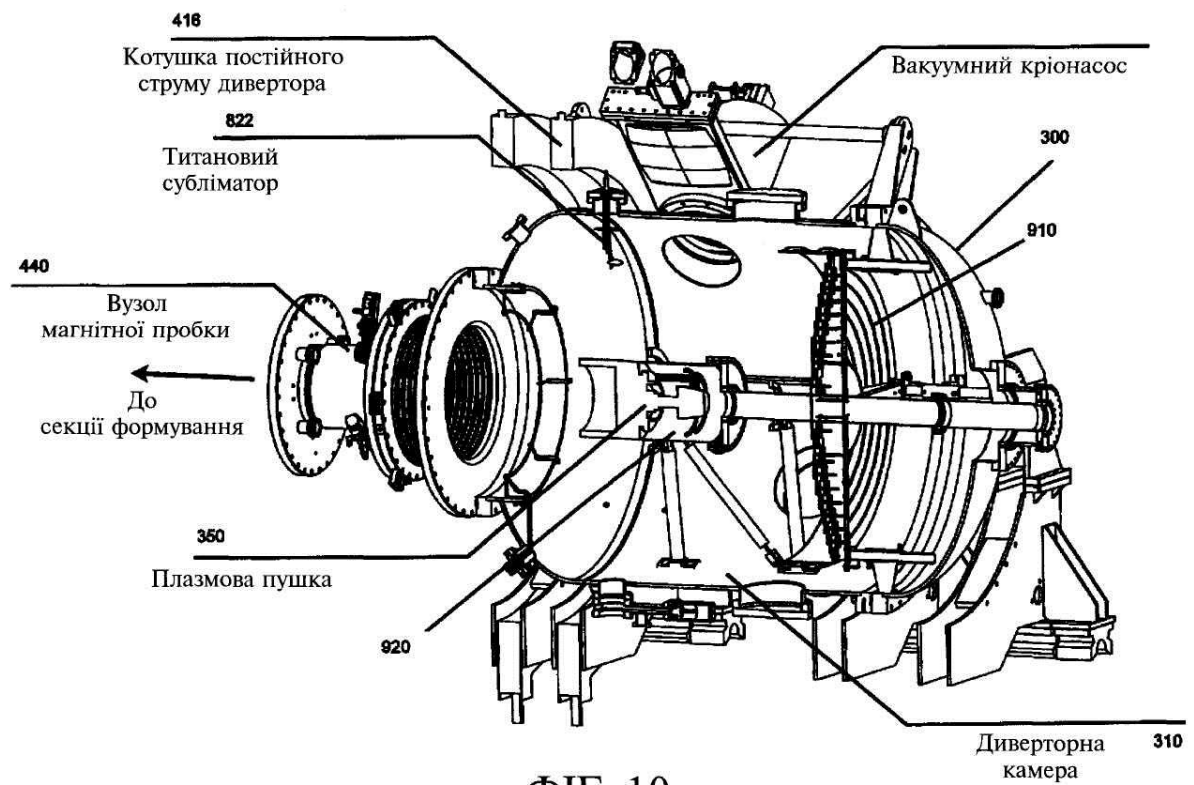
ФІГ. 7



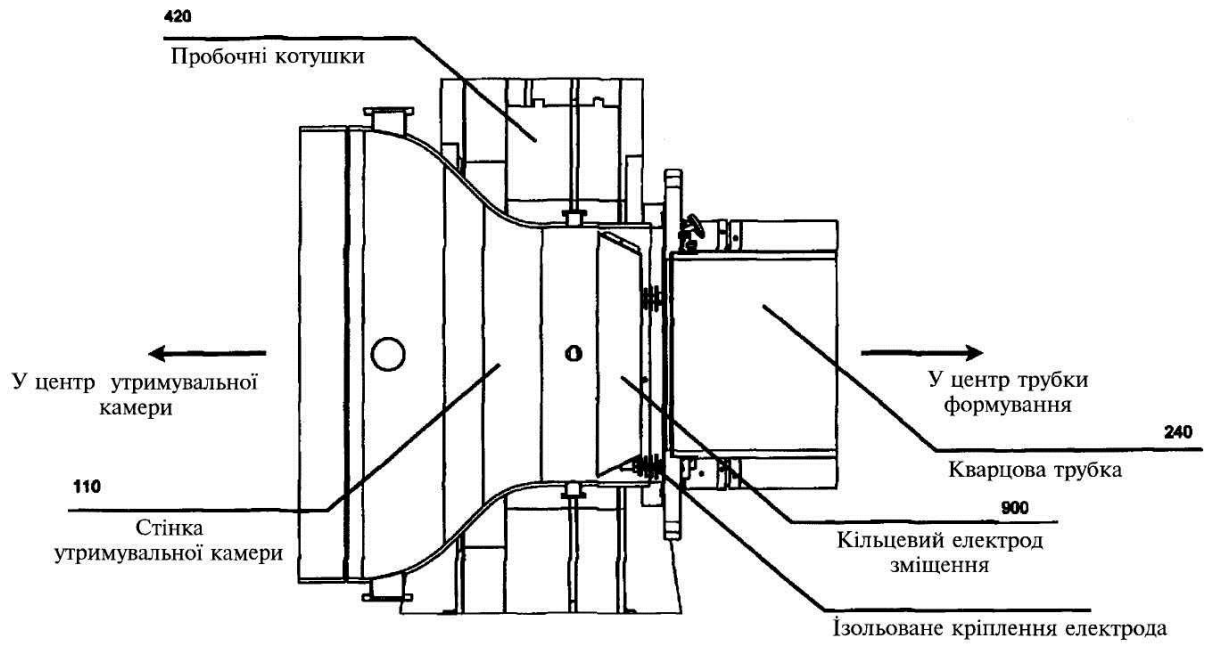
ФІГ. 8



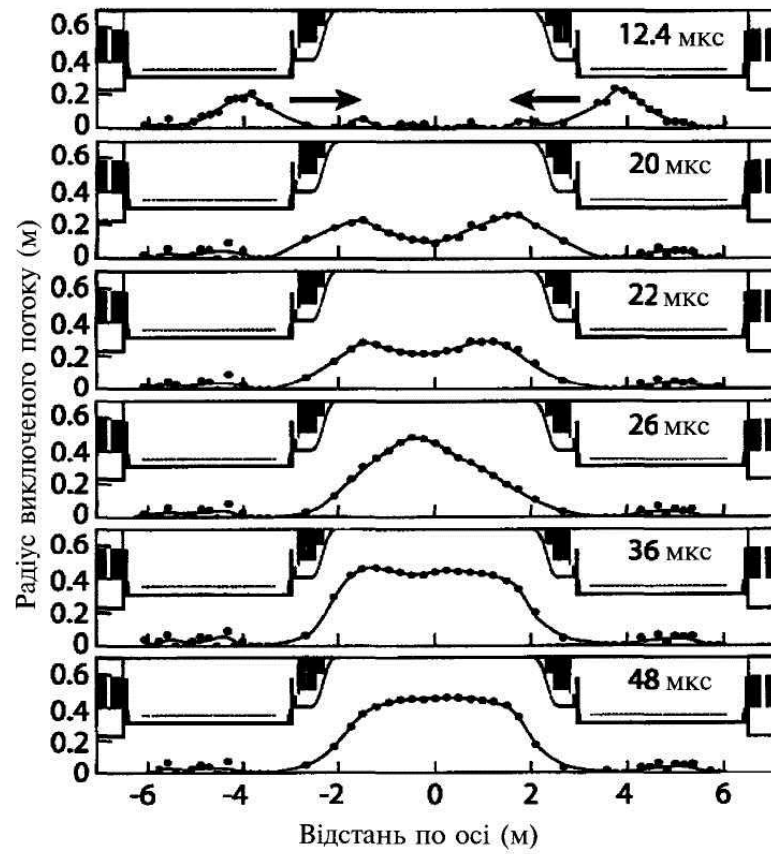
ФІГ. 9



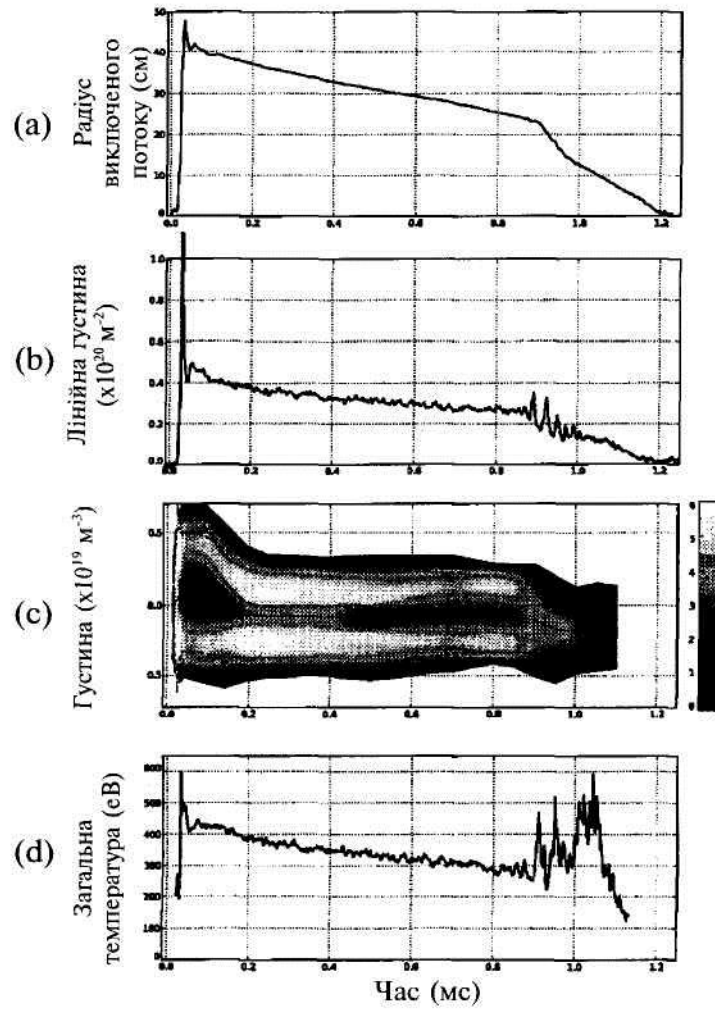
ФІГ. 10



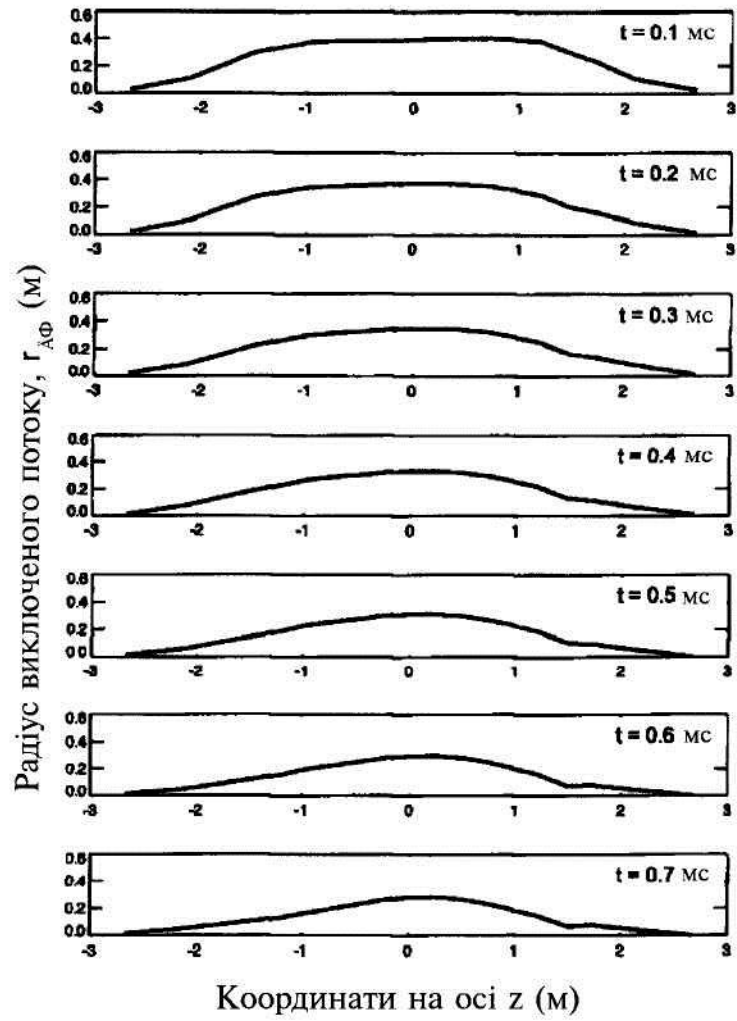
ФІГ. 11



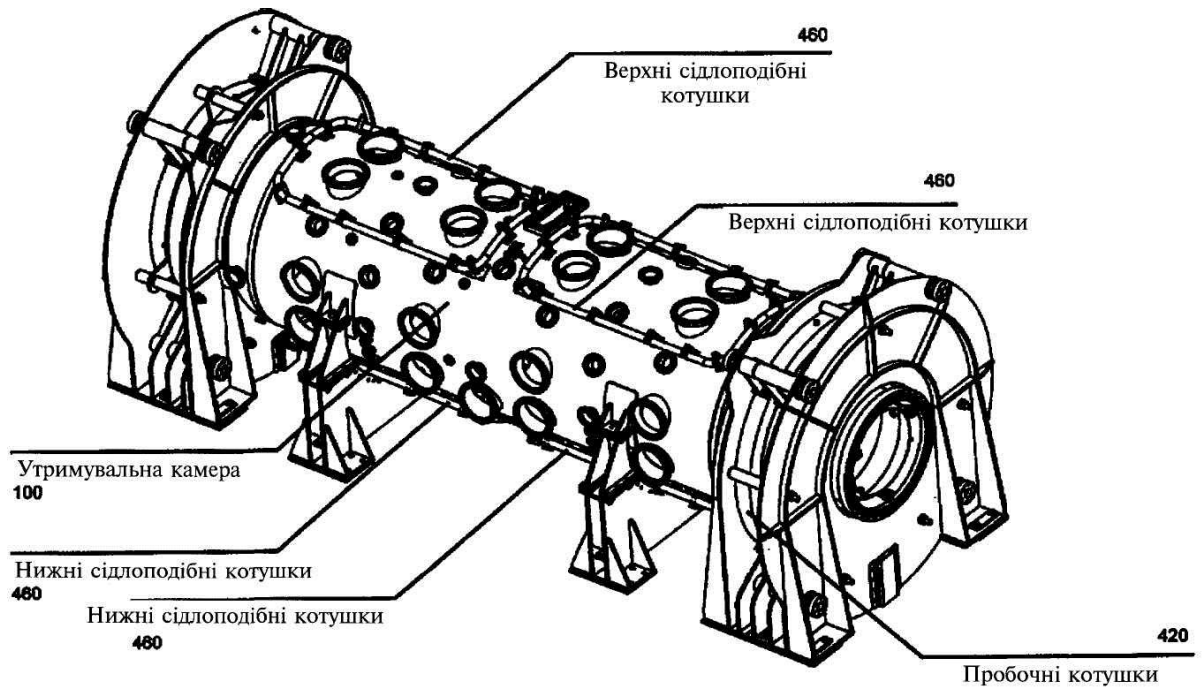
ФІГ. 12



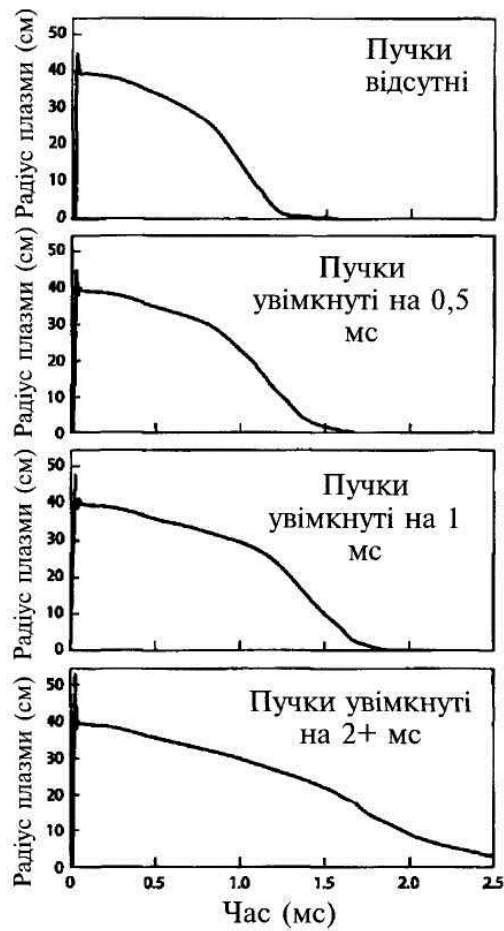
ФІГ. 13



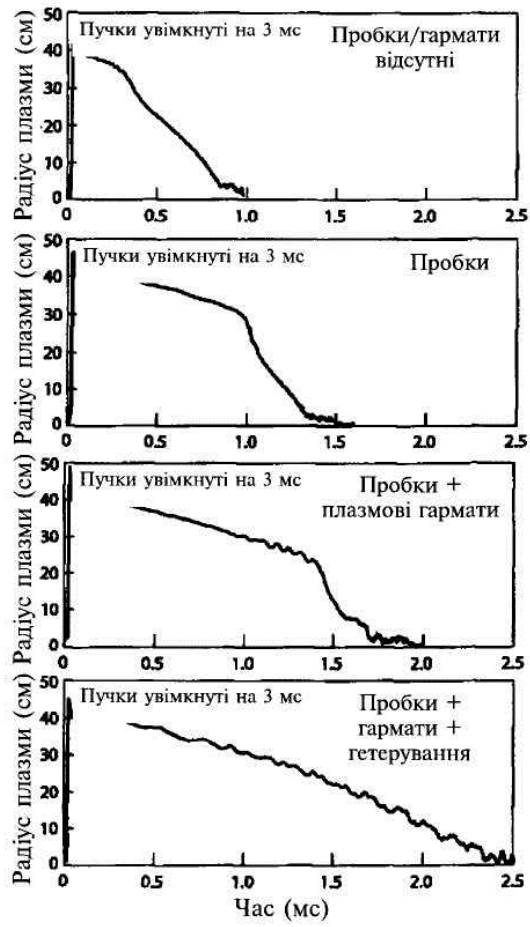
ФІГ. 14



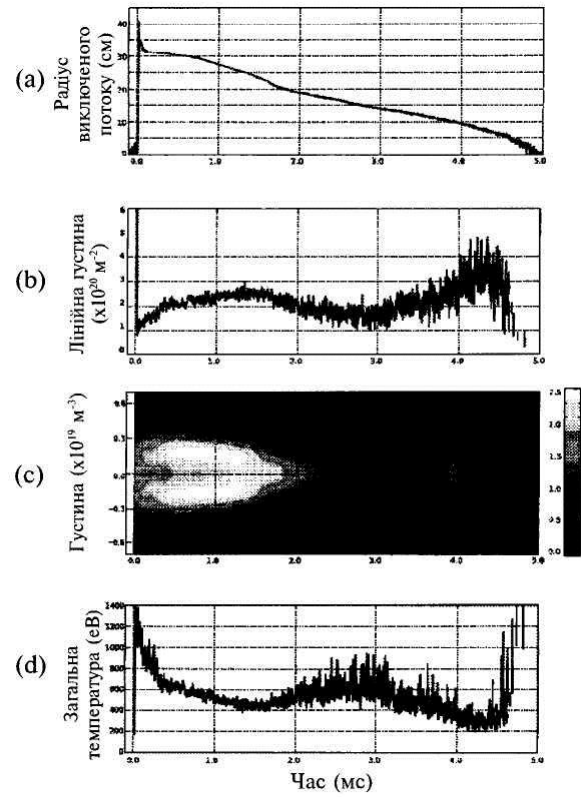
ФІГ. 15



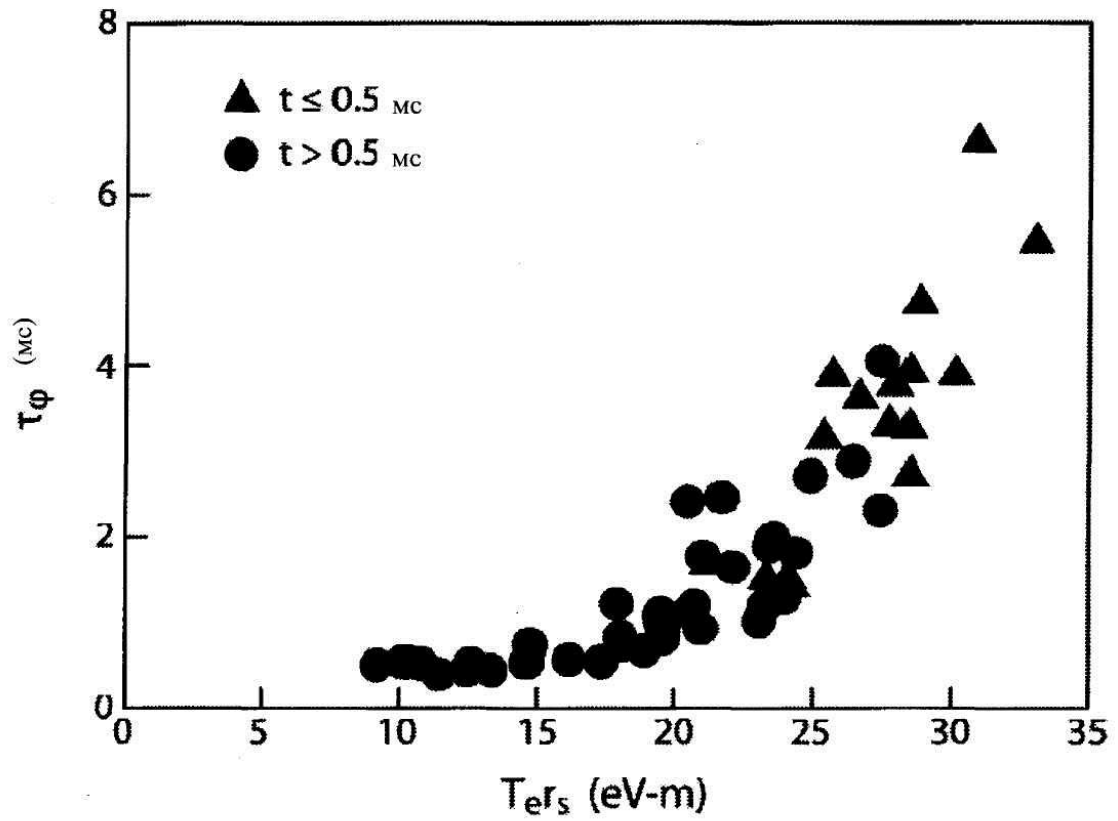
ФІГ. 16



ФІГ. 17



ФІГ. 18



ФІГ. 19

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601