

УДК 533.9; 621.039

**МАГНІТО-ПЛАЗМОВІ СЕПАРАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ЇХ МОЖЛИВЕ  
ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ВЯП І РАВ***Ю.В. Ковтун, Є.І. Скібенко, В.Б. Юферов**(Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут” НАНУ)*

У роботі розглядається можливість використання магнітоплазмових сепараційних технологій для вирішення проблеми переробки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) і радіоактивних відходів (РАВ). З урахуванням проведеного аналізу запропонована і представлена технологічна блок-схема переробки ВЯП при використанні для цих цілей магнітоплазмових сепараторів. Наведено опис пристрою для поділу речовини на елементи, у якому основним фізичним механізмом створення і нагрівання плазми є колективні процеси, що виникають при пучково-плазмовій взаємодії. Визначено розміри напівпромислового варіанта сепараційного пристрою.

Метою даної роботи є вивчення можливості використання іонно-атомних сепараційних технологій для вирішення проблеми переробки ВЯП і РАВ з залученням ефективних фізичних механізмів утворення та нагрівання плазми в сепараційному пристрої, наприклад, механізму пучково-плазмової взаємодії.

Для переробки радіоактивних відходів [1], а також відпрацьованого ядерного палива [2], в літературі [3-5] обговорюється можливість застосування магнітоплазмових сепараторів (МПС). Ідея переробки полягає в наступному: робоча речовина ВЯП чи РАВ підготовляється для подачі в блок фазових перетворень, де в наступному відбувається перетворення речовини, яка розділяється, з твердого (рідкого) стану у пароподібний, після чого вводиться в камеру плазмового джерела для її іонізації. Іони створеної плазми, що знаходяться в магнітному полі, селективно нагріваються, що приводить до зміни їхньої траєкторії руху в магнітному полі, просторового розподілу “гарячих” і “холодних” іонів, осадженню їх на іоноприймальні пластини, з яких надалі проводиться видалення осілих елементів. При цьому можливий поділ іонів плазми, відповідно, речовини РАВ та ВЯП, на легкі і важкі масові групи – так умовно названа “часткова сепарація”, або по-елементне розділення, тобто “повна сепарація”. При “частковій сепарації” ставиться задача зменшення питомої частки радіоактивної частини в РАВ, що зберігаються, коли не потрібна їх повна переробка.

Використання магніто-плазмових сепараторів у процесі переробки ВЯП і РАВ можливо в наступних випадках: у першому – використання МПС як перший крок процесу переробки ВЯП, а саме, відділення діоксида урану від продуктів розпаду, що дозволить зосередити основну активність РАВ в найбільш компактному вигляді на прийомних пластинках у твердій фазі; у другому – переробка РАВ, що утворюються на радіохімічному заводі (РХЗ) після хімічної переробки ВЯП. В обох випадках розглядається “часткова сепарація”. У проєкті “Архімед” [3] запропоновано використання магніто-плазмового сепаратора на стадії переробки рідких ВАВ (високоактивних відходів), що дозволить зменшити кількість ВАВ для наступного зв'язування їх в боросілікатному склі. Така технологія дозволяє значно знизити кількість осклованих ВАВ (вартість переробки для отримання однієї каністри ємністю ~ 0,8м<sup>3</sup> з осклованими ВАВ

коливається від 500 тис. до 1 млн. дол.), заощадити кошти на його переробку і зберігання, оскільки вимоги при зберіганні ВАВ набагато вищі, ніж при зберіганні середньо і низькоактивних відходів.

Відпрацьоване ядерне паливо являє собою тепловиділяючі елементи (твели), у яких таблетки діоксида урану вкладені в оболонку з цирконієвого сплаву, у свою чергу твели зібрані в тепловиділяючі збірки (ТВЗ). ВЯП має високу радіоактивність, що складається з радіоактивності накопичених у твелах продуктів поділу, а також з радіоактивності продуктів їхнього розпаду (у твелах концентрується більше 99,5% усіх радіоактивних нуклідів, що виникають на АЕС). Поряд з продуктами поділу урану у твелах у результаті реакцій радіаційного захоплення нейтронів актиноїдами і процесів їхнього розпаду накопичуються трансуранові елементи.

На рис.1 представлена технологічна блок-схема переробки ВЯП при використанні магнітоплазмових сепараторів. При цьому передбачається розміщення установки МПС на території атомної електростанції, що дозволить відмовитися від перевезення високоактивного відпрацьованого ядерного палива на РХЗ.

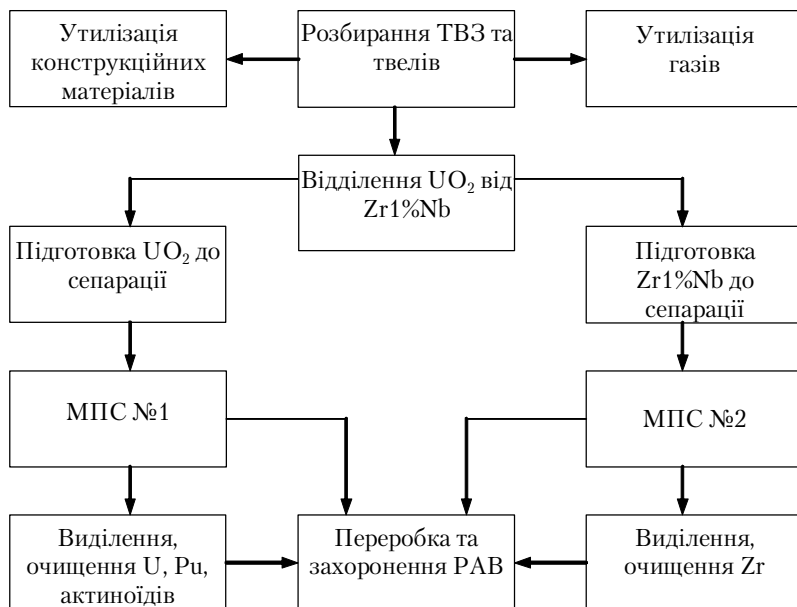


Рис. 1. Блок-схема технології переробки ВЯП при використанні магнітоплазмових сепараторів

Технологія переробки ВЯП магнітоплазмовими сепараторами буде включати наступні стадії:

- вивантаження з реактора відпрацьованого ядерного палива;
- витримку ВЯП в охолоджувальних басейнах на АЕС у середньому протягом 3 – 5 років;
- розбирання ТВЗ і твелів, при цьому відбувається відділення конструкційних матеріалів від оболонок ТВЗ і твелів, паливних елементів, а також виділення газів, що заповнюють об'єм твела (He, Xe, N<sub>2</sub> і т.д.);

- переробку конструкційних матеріалів, відправлення на зберігання, утилізацію газів;
- відділення паливних таблеток від оболонок твелів. Це дозволить окремо переробляти і виділяти  $UO_2$  і Zr за допомогою МПС №1 і № 2.

На рис. 2 приведена блок-схема сепаруючого пристрою. Основними частинами даного пристрою є: вакуумна система, магнітна система, фор-інжектор речовини, яка розділяється, фізична і технологічна діагностики, система розбирання і збирання продукції, система контролю і керування.

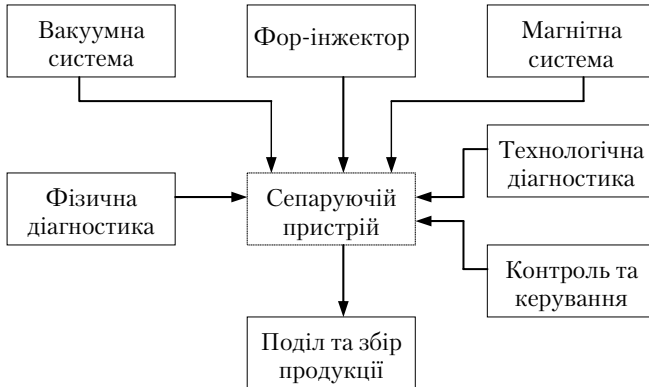


Рис. 2. Блок-схема сепаруючого пристрою (МПС)

Вакуумна система забезпечує необхідну величину робочого тиску в об'ємі МПС. Вона компонується безмасляними засобами відкачки, як на стадії попереднього розрідження від атмосфери, так і на високовакуумній стадії. З одного боку, це зв'язано з тим, що система збору елементів – це практично система напилування та осадження плівок. Наявність вуглеводів в установці приведе до появи водневих і вуглецевих іонів у плазмі, збільшить частоту зіткнень і, як наслідок, величину втрат плазми, а також надходження паразитних забруднюючих домішок у вже розділений продукт. З іншого боку, це пов'язано з забезпеченням низького рівня впливу на навколишнє середовище, що вимагає створення замкнутої системи відкачки, яка складається з ряду накопичувальних ємностей, у яких відбувається нагромадження радіоактивних продуктів відкачки з наступною їх утилізацією. При цьому не допускається попадання пару та масла в об'єми накопичувальних ємностей.

Поблочна вакуумна система містить:

- блок попереднього розрідження для відкачки об'єму МПС від 760 тор до  $1 \cdot 10^{-2}$  тор зі швидкістю відкачки повітря від 20 до 100 л/с;
- блок високовакуумної відкачки, що забезпечує робочий тиск у сепараторі на рівні  $1 \cdot 10^{-6}$  тор, зі швидкістю відкачки від  $3 \cdot 10^3$  до  $1 \cdot 10^4$  л/с;
- лінію диференціальної відкачки для мінімізації потоку нейтральних атомів з камери іонізації в зону розділення в залежності від газового навантаження, в перших трьох блоках вакуумної відкачки передбачається широке використання криогенних методів одержання вакууму в діапазоні тисків  $760 - 1 \cdot 10^{-6}$  тор, які найліпше відповідають вимогам вакуумної системи, що не містить масла;

- блок виміру і контролю вакуумних умов;
- блок енергоживлення вакуумної системи.

Надпровідна магнітна система формує аксіальне магнітне поле однорідної чи пробочної конфігурації з несиметричними пробками [6] і складається з:

- надпровідникових магнітів, виготовлених з надпровідника на основі потрійного сплаву ніобій-титан-тантал або на основі інтерметаліда ніобій-олово; вибір того чи іншого надпровідника може бути пов'язаний з режимом роботи установки, геометрією надпровідних обмоток та варіантом розміщення магнітної системи відносно вакуумної камери – внутрішнє чи зовнішнє; внутрішнє розміщення магнітної системи буде доцільним у випадку створення та нагрівання плазми за рахунок пучково-плазмової взаємодії; в цьому випадку слід очікувати суттєвого скорочення як капітальних, так і експлуатаційних витрат за рахунок зменшення об'єму (енергії) магнітного поля та кількості надпровідника;
- блоку криоохолодження надпровідникових магнітів, який може працювати в рефрижераторному режимі або в рідинноналивному; якщо вибирається варіант рідинної ванни, то на стадії передохолодження магнітної системи охолоджувальний пристрій може бути двох- чи трьох-ступінчастим, що використовує в якості криогентів зріджені гази азот, неон і гелій, що киплять при атмосферному чи зниженому тиску; потужність криоохолоджувального пристрою буде складати 50–100 Вт на рівні гелієвих температур в залежності від типу струмоводів, що використовуються, та з урахуванням витрат на криогенну відкачку установки;
- блоку енергоживлення надпровідникової магнітної системи.

Фор-інжектор для заповнення об'єму сепаратора речовиною, що розділяється, в іонізованому стані складається з:

- системи подачі робочої речовини, що забезпечує безперервну доставку речовини в блок фазових перетворень;
- блоку фазових перетворень, у якому вихідна речовина, що розділяється, переходить із твердого в пароподібний стан;
- дозатора, що регулює масову витрату речовини, що розділяється, для підтримки сталості потоків нейтральної речовини і металеві плазми, відповідно;
- камери іонізації, де відбувається іонізація речовини, що розділяється, в паровій фазі й утворення металеві плазми необхідних параметрів за допомогою механізму пучково-плазмової взаємодії;
- іонізатора (електронної гармати) для одержання електронного пучка, що провадить іонізацію речовини, яка розділяється, в паровій фазі за рахунок ударної іонізації на лінійній стадії і колективних процесів на стадії нелінійного (експонентного) росту щільності плазми;
- засобів технологічної діагностики для постійного контролю температури і тиску пари у блоці фазових перетворень;
- блоку енергоживлення фор-інжектора.

Фізична діагностика використовує безконтактні методи, такі як спектрометричні і СВЧ методи, і повинна контролювати наступні параметри:

- ВЧ-, Е- і Н-поля;
- іонні потоки;
- щільність плазми;

- температуру іонів і електронів;
- флуктуації щільності і температури плазми;
- профіль просторового розподілу щільності плазми;
- зарядність іонів;
- швидкість плазмового потоку;
- частоту обертання плазми.

Система розділення і збирання продукції – зона, у якій відбувається розділення і збирання продукції, складається з:

- блоку нагрівання компонент плазми;
- зони розділення, у якій відбувається просторове розділення “гарячих” і “холодних” іонів;
- іоноприймача, що представляє собою набір іоноприймальних пластин для осадження робочої речовини;
- шлюзу, що дозволяє вивантажувати продукцію без розгерметизації робочої камери сепаратора;
- пристрою для вивантаження продукції.

Технологічна діагностика дозволяє проводити контроль працездатності всіх систем сепаратора.

Контроль і керування – це автоматизована система, що зв’язує у єдину систему всі системи МПС для керування і контролю за технологічним процесом розділення речовини.

На рис.3 представлена схема пристрою для розділення речовини на елементи [7].

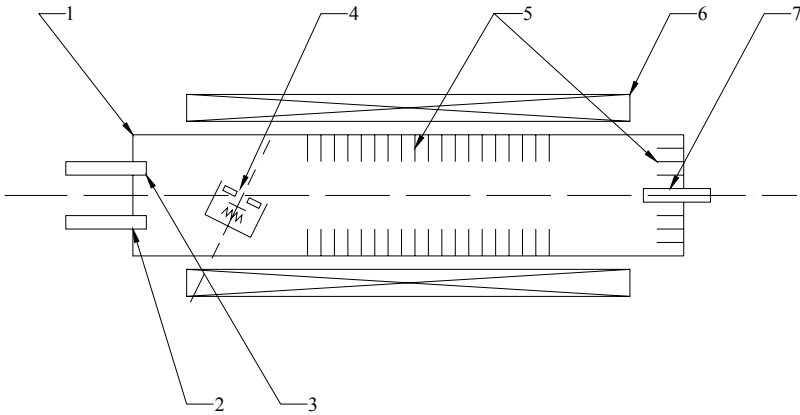


Рис. 3. Схема пристрою для розділення речовини на елементи

Пристрій містить вакуумну камеру 1, з'єднану з вузлом подачі речовини, що розділяється, 2 і вузлом подачі підпалювального газу 3. Усередині камери 1 розміщене джерело плазми у вигляді електронної гармати 4 і приймач плазмового потоку у вигляді пластин 5. Пристрій має магнітну систему 6, що охоплює камеру 1. На протилежному від місця розміщення вузла подачі речовини, що розділяється, 2, вузла подачі підпалювального газу 3 і електронної гармати 4 у торці вакуумної камери 1 розміщений колектор пучка 7. Для запропонованого пристрою, зображеного на рис.4, основним фізичним

механізмом створення і нагрівання плазми в цьому пристрої є колективні процеси, що виникають при пучково-плазмовій взаємодії [8].

У роботі магніто-плазмового сепараційного пристрою можна виділити кілька послідовно виконуваних стадій. У першу чергу – це стадія приготування робочої речовини в необхідному фазовому стані, тобто пароподібному. Для її стартової реалізації вимагаються досить значні витрати часу та енергії. Друга стадія – це подача (транспортування) речовини, що розділяється, в паровій фазі в зону іонізації. При цьому можливі різні варіанти дозованої подачі речовини, що розділяється, в область пучково-плазмового розряду: – фронтальна подача речовини назустріч електронному пучку; – бічна подача по радіусу системи; – подача речовини, що розділяється, в супутньому потоці в напрямку інжекції електронного пучка. По всім трьом варіантам введення (інжекції) передбачається, що речовина може бути доставлена в будь-яку точку сепараційного об'єму (тракту). Третя стадія – іонізаційна (ударна іонізація по лінійному закону). Відзначимо, що у випадку пучково-плазмового розряду іонізаційна область може бути реалізована в будь-якій точці сепараційного об'єму (тракту), де створена надлишкова щільність нейтральних часток речовини, що розділяється, порядку  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Четверта стадія – теж іонізаційна, але в цьому випадку за рахунок колективних процесів наростання щільності відбувається вже по нелінійному (експонентному) закону. На п'ятій стадії реалізація механізму колективної пучково-плазмової взаємодії в розряді дозволяє поряд з нагріванням електронів робити також нагрівання іонів, що зв'язано з виникненням у розряді радіального електричного поля, що приводить до обертання плазми, розміщеної в подовжньому магнітному полі. Відносний рух різних по заряду і масі компонентів плазми приводить до нестійкості плазми щодо подовжніх коливань обертової плазми і виникненню іонно-циклотронних коливань з частотою  $\omega \sim \omega_{H^+}$ , коли частота обертання стає близькою до іонно-циклотронної частоти  $\omega_{H^+}$ . Таким чином, обертання плазми і нагрівання іонів відбувається за рахунок самозбуджених електронним пучком іонних циклотронних коливань в розряді. На шостій стадії відбувається просторовий поділ у магнітному полі “гарячих” і “холодних” іонів, осадження їх на іоноприймальних пластинах, з яких надалі провадиться видалення осілих елементів.

Перевагою (достоїнством) даного методу створення плазми є те, що електронний пучок від зовнішнього джерела (електронної гармати) у вакуумі і подовжньому магнітному полі поширюється практично без втрат на відстані порівняні з довжиною сепаратора. Це дозволяє використовувати різні способи подачі робочої речовини, по суті справи, у будь-яку точку (область) інжекційного тракту. В умовах пучково-плазмового розряду можливо досягти 100% вигорання нейтралів [9], тобто 100% іонізації робочої речовини.

Очікувані розміри напівпромислового варіанта сепаруючого пристрою можуть бути наступними: радіус плазми  $\sim 0,5 \text{ м}$ , довжина плазмового стовпа (утворення)  $\sim 4 \text{ м}$  і, отже, об'єм плазми  $3,14 \text{ м}^3$ , щільність іонного компонента плазми  $\geq 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , температура електронів плазми  $T_e \leq 50 \text{ еВ}$ , температура іонів  $T_i \sim 20 \text{ еВ}$ . Подальші розрахунки та оцінки будуть проводитись з урахуванням цих розмірів і величин.

Для поділу речовини по елементам масову продуктивність МПС можна записати в наступному виді:

$$m = M \cdot \Delta\mu \cdot n(r) \cdot v \cdot s \cdot K_{\text{эф.}} \cdot t_n, \quad (1)$$

$$n(r) = n_{max} \cdot \left(1 - \frac{r}{r_{max}}\right)^\gamma, \quad (2)$$

де  $M$  – вага атома, г;

$m$  – процентний вміст елемента в речовині;

$n(r)$  – щільність плазми в залежності від радіальної координати;

$n_{max}$  – максимальне значення щільності плазми;

$r_{max}$  – максимальний радіус плазмового утворення;

$\gamma$  – показник степеневі функції, що характеризує профіль просторового розподілу щільності плазми;

$v$  – швидкість плазмового потоку;

$s$  – площа поперечного перерізу плазмового потоку;

$K_{ef}$  – коефіцієнт ефективності сепаратора;

$t_u$  – час накопичення елемента, с.

Коефіцієнт  $K_{ef}$  характеризує ефективність перетворення пароподібної речовини в іонізовану, поділ іонів плазми по масам, збирання розділених іонів на приймальних пластинах у сепараторі.

Розрахункове значення масової продуктивності сепаратора на добу (за формулами 1, 2) при переробці ВЯП реактора ВВЭР-1000 для різних значень  $K_{ef}$ , приведено на рис. 4. Ізотопний склад відпрацьованого ядерного палива відповідає [10].

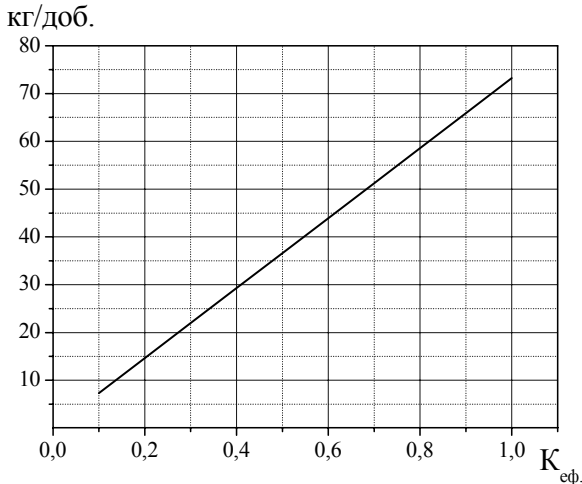


Рис. 4. Залежність масової продуктивності сепаратора для різних значень коефіцієнта ефективності

Як видно з рисунка 4, продуктивність МПС для коефіцієнта ефективності сепаратора 0,5 і 1 складає 36 і 73 кг на добу суміші урану з трансурановими нуклідами, відповідно. При коефіцієнті ефективності сепаратора 0,5–0,8 річна кількість переробленого палива складе 13–21 т.

Таким чином, на основі проведеної роботи можна дійти таких висновків:

1. З урахуванням проведеного аналізу запропонована і представлена технологічна блок-схема переробки ВЯП при використанні для цих цілей магнітоплазмових сепараторів.

2. Обговорено можливість застосування магнітоплазмових сепараторів для переробки радіоактивних відходів, а також відпрацьованого ядерного палива. Наведено опис процесу переробки з використанням МПС. Представлено блок-схему сепаруючого пристрою.

3. Наведено опис пристрою для розділення речовини на елементи, у якому основним фізичним механізмом створення і нагрівання плазми є колективні процеси, що виникають при пучково-плазмовій взаємодії.

4. Визначено розміри напівпромислового варіанта сепаруючого пристрою, а також залежність його добової масової продуктивності від ефективності сепаратора.

5. Наведений аналіз і розрахунки показують прийнятність використання магнітоплазмових сепараційних технологій у рішенні проблеми переробки ВЯП і РАВ. Найкращим варіантом використання МПС для переробки ВЯП і РАВ має бути варіант його розміщення та експлуатація на близькій відстані від джерела ВЯП і РАО, тобто біля або на території АЕС або іншого об'єкту, що має таку потребу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Неклюдов И.М., Красноруцкий В.С. О научно-технической поддержке ядерно-энергетического комплекса Украины // Ядерні та радіаційні технології. – Т.6, №1–2. – 2006. – С. 15–24.
2. Красноруцкий В.С. О ядерном топливном цикле Украины // Ядерні та радіаційні технології. – Т.6, №1–2. – 2006. – С. 7–14.
3. Gilleland J., Ohkawa T., Agnew S., Cluggish B., Freeman R., Miller R., Putvinski S., Sevier L., Umstadter K. Application of Archimedes Filter for Reduction of Hanford HLW // WM'02 Conference. – Tucson (USA). – 2002.
4. Zhil'tsov V.A., Kulygin V.M., Semashko N.N., Skovoroda A.A., Smirnov V.P., Timofeev A.V., Kudryavtsev E.G., Rachkov V.I., Orlov V.V. Plasma separation of the elements applied to nuclear materials handling // Atomic Energy. – 2006. – Vol. 101, № 4. – P. 755–759.
5. Скибенко Е.И., Юферов В.Б., Ковтун Ю.В. Концептуальный проект плазменного источника на основе пучково-плазменного разряда для сепарационных технологий // Сборник докладов 8-го Международного конгресса “Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов”. Том 1. – Харьков: ННЦ ХФТИ. – 2007. – С. 232–238.
6. Скибенко Е.И., Ковтун Ю.В., Юферов В.Б. Фор-инжектор разделяемого вещества на основе пучково-плазменного разряда для ионно-атомных сепарационных технологий. Концептуальный проект. Часть вторая. // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2007. – № 20 – С. 180–189.
7. Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. Пристрій для розділення речовини на елементи: Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00 / Є.І.Скибенко, Ю.В.Ковтун, В.Б.Юферов; Заявл. 16.03.2007; Опубл. 10.09.2007, Бюл. №10. – 3 с.
8. Файнберг Я.Б. Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой // Атомная энергия. – 1961. – Т.11, № 4. – С. 313–335.
9. Alexeff I., Estabrook K., Hirose A., Jones W.D., Neidigh R.V., Olsen J.N., Scott F.R., Stirling W.L., Widner M.M., Wing W.R. Understanding turbulent ion



heating in the OAK Ridge mirror machine, 'BURNOUT V' // Physical Review Letters. – 1970. – Vol.25, №13. – P. 848–851.

10. Круглов А.К., Рудик А.П. Реакторное производство радиоактивных нуклидов. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 256 с.