

ДИНАМІКА ЧАСТИНОК З ВЕЛИКИМИ ПОЧАТКОВИМИ ПОПЕРЕЧНИМИ ШВИДКОСТЯМИ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ ГОСТРОКУТОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ

А.Г. БЕЛКОВ, В.Г. ПАПКОВИЧ

Національний науковий центр

“Харківський фізико-технічний інститут” НАН України

(Вул. Академічна, 1, Харків 61608; e-mail: parpovich@kipt.kharkov.ua)

УДК 533.9.01
© 2012

Розглянуто рух заряджених частинок, що інжектуються з великими початковими енергіями поперечного руху ($E_{\perp} \sim E_{\parallel}$), у системі з гострокутовою геометрією магнітного поля. Отримано залежності глибини проникнення і проходження через систему таких частинок за різних умов на вході. Показано, що частинки з однаковою початковою енергією поперечного руху можуть пройти через систему або відбитися залежно від співвідношення між початковою радіальною та азимутальною швидкостями. Розглянуто характеристики потоку частинок у центрі системи в перетині, де магнітне поле дорівнює нулю (швидкість частинок, радіальний зсув частинок щодо стартового радіуса, спрямованість потоку), залежно від початкової радіальної швидкості. Запропоновано можливі застосування результатів дослідження.

здійснювали коливання у середині системи в перебігу часу більше пролітного. У розрахунках припускали, що при вході в поле частинки мали тільки складову швидкості, що орієнтована уздовж силової лінії, поперечні до силових ліній складові швидкості були відсутні. Показано, що проходження частинок через систему визначається величиною параметра $\eta = r_0/r_L$, де r_0 – початкове положення частинки, $r_L = v_0/\omega_c$ – ларморовський радіус, v_0 – початкова швидкість частинки, $\omega_c = eH_0/Mc$ – циклічна частота, H_0 – магнітне поле у положенні старту частинки, M – маса частинки. Частинки проходили при виконанні умови $\eta < \eta^{cr} < 1$, де η^{cr} – значення параметра η , при якому частинки починають відбиватися.

1. Вступ

Аксіально симетрична система із зустрічними магнітними полями розглядалася як один з можливих варіантів магнітної пастки для утримання плазми. Для з'ясування ефективності утримання заряджених частинок у такій системі проводили теоретичні та експериментальні роботи (див., наприклад, [1, 2] та посилання в них). У роботі [2] проведено числові розрахунки руху частинок, що інжектуються у торець із положення, зміщеного щодо осі, для деяких конфігурацій магнітного поля. Ці розрахунки дозволили зробити класифікацію траєкторій частинок. Частина частинок ішла уздовж силових ліній магнітного поля, не перетинаючи площини нульового магнітного поля. Інша частина проходила через систему і залишала пастку через протилежну пробку. Ще одна частина частинок захоплювалася в пастці, і частинки

Надалі, коли розглядали застосування такої конфігурації магнітного поля для поділу ізотопів, знадобилося врахування початкових поперечних складових швидкості частинки [3]. Чистота поділених ізотопів залежала від величини початкової поперечної швидкості. У більшості розглянутих випадків повного поділу досягали, коли максимальна початкова радіальна швидкість інжектуюваних частинок не перевищувала $0,05v_0$. Частинки з більшими радіальними швидкостями вносили забруднення у виділений ізотоп. Проведені розрахунки [3] показали, що після проходження площини нульового магнітного поля частинками, у яких початкова радіальна швидкість відмінна від нуля, збільшується радіальний розмір області, у якій рухаються частинки. Частинки із початковими радіальними швидкостями $\dot{r}_0 > |0,05|$ при проходженні системи більш сильно гальмуються, і починається відбиття таких частинок насамперед з $\dot{r}_0 < 0$. Із цих розрахунків можна було зробити висновок, що

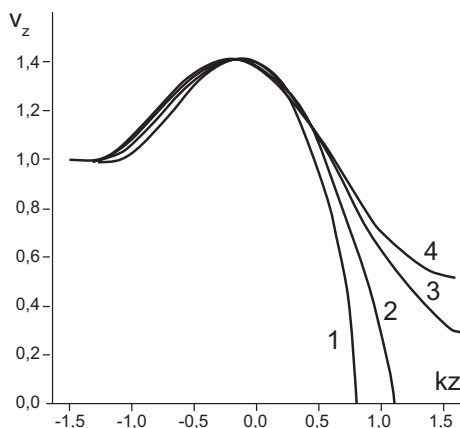


Рис. 1. Розподіл поздовжньої швидкості частинки при русі через магнітну систему при різних значеннях початкової радіальної швидкості: $v_{\perp} = v_0$, $\dot{r}_0 = -0,8$ (1), $0,3$ (2), $0,6$ (3), $0,7$ (4)

відбір виділених ізотопів необхідно робити після проходження частинками всієї системи в області на виході, яку частинки з більшими поперечними швидкостями не досягають. Розглянутий інтервал початкових радіальних швидкостей не перевищував 0,1.

Оскільки у пучку присутня деяка частка частинок з більшими поперечними до магнітного поля складовими швидкості, необхідно розглянути рух таких частинок у більш широкому інтервалі поперечних швидкостей, щоб оцінити їхній внесок у загальний баланс відсепарованих і відбитих частинок. Варто також врахувати, що при заданій величині енергії поперечного руху у частинок, що налітають на магнітну конфігурацію, частки енергії, яка припадає на азимутальний і радіальний рухи, можуть відрізнятися.

2. Процедура обчислення

У даній роботі наведено результати розрахунків для випадку, коли початкова енергія поперечного руху частинок порівнянна з енергією спрямованого руху. Розв'язано систему рівнянь, яка в циліндричній системі координат r, z, φ має вигляд [2]:

$$\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 = -\omega_c r \dot{\varphi} I_0(kr) \sin kz,$$

$$\ddot{z} = -\omega_c r \dot{\varphi} I_1(kr) \cos kz,$$

$$\dot{\varphi} = \omega_c \left[\frac{\sin(kr)I_1(kr)}{kr} + \frac{1}{\omega_c} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \dot{\varphi}_0 + \frac{kr_0}{(kr)^2} I_1(kr_0) \right].$$

Компоненти магнітного поля H_z, H_r задавали у вигляді першої гармоніки розв'язку, наведеного у роботі

[2]. Для числового розв'язку рівняння приводили до безрозмірного вигляду. Безрозмірні поздовжня і радіальна координати записуються у вигляді kz, kr , де $k = \pi/2L$, $2L$ – відстань між пробками (поздовжній розмір системи). Як характерні величини обрано v_0, H_0 – швидкість частинки, що налітає, і магнітне поле у початковому положенні відповідно. Безрозмірні поздовжня і радіальна швидкості $v'_z = v_z/v_0, r' = \dot{r}/v_0$. Надалі у тексті штрихи у безрозмірних величин не вживаються. Повну енергію поперечного руху частинки можна записати у вигляді суми радіальної і азимутальної енергій: $E_{\perp} = M(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2)/2$. Передбачалося, що частинка, що рухається у постійному поздовжньому магнітному полі, досягає лівої межі конфігурації магнітних полів з відмінної від нуля хоча б однієї радіальної або азимутальної складової швидкості. Початкові умови на цій межі у перетині $kz = -1,57$ задавали у такому вигляді: $r = r_0, v_z = v_0, \dot{r} = \dot{r}_0, \dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0$. При заданій повній енергії поперечного руху радіальна швидкість частинки може набувати значень від $\dot{r}_{0\max}$ до $-\dot{r}_{0\max}$ ($\pm\dot{r}_{0\max}$ відповідає випадку, коли вся поперечна енергія міститься в радіальному русі). Залежно від вибраного значення радіальної швидкості із цього інтервалу змінюється і величина азимутальної швидкості. Величину параметра η вибирали меншу η^{cr} , так що умови для проходження виконувалися для частинок, у яких поперечні складові швидкості зовсім відсутні або малі.

3. Результати числових розрахунків

На рис. 1 наведено розподіли v_z складової швидкості уздовж системи для частинки, у якій при вході половина енергії міститься у поперечному русі. Параметром кривих є величина початкової радіальної швидкості \dot{r}_0 .

Як бачимо, поперечна енергія майже повністю трансформується в поздовжній рух, коли частинка, рухаючись у спадаючому магнітному полі, досягає центра системи. Розходження у величині поздовжньої швидкості при $kz = 0$ залежно від початкової радіальної швидкості невеликі і становлять близько 5%. Величина поздовжньої швидкості при $\dot{r}_0 = -0,8$ становить $v_z = 1,39$, при $\dot{r}_0 = 0,6 - v_z = 1,361$. Максимальна швидкість обчислена по повній енергії частинки у цьому перетині $v_z = 1,414$. У подальшому русі глибина проникнення частинки залежить від величини початкової радіальної швидкості. Як видно з рисунка, частинка може відбитися (криві 1, 2) або

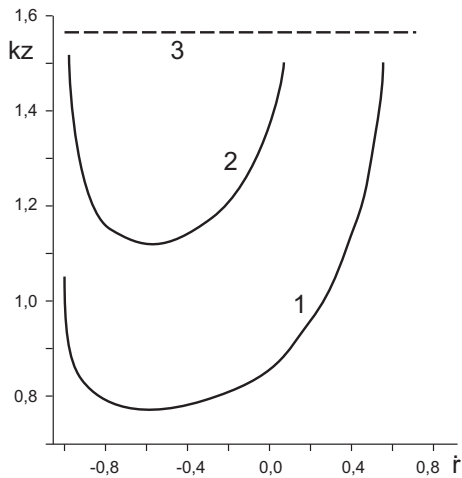


Рис. 2. Глибина проникнення частинок у магнітну систему залежно від початкової радіальної швидкості при різних стартових радіусах: $kr_0 = 0, 14$ (1), $kr_0 = 0, 18$ (2)

пройти систему (криві 3, 4). Більш докладні результати наведено на рис. 2.

Кривими позначено місце відбиття частинок з початковою енергією поперечного руху, що дорівнює поздовжній енергії, які пройшли площину нульового магнітного поля, залежно від величини початкової радіальної швидкості для двох стартових радіусів. Найбільш сильно гальмуються частинки, у яких початкові радіальні швидкості знаходяться у межах $-0,5 - 0$, тобто мають досить великі азимутальні складові швидкості. Частинки з великими початковими радіальними швидкостями, спрямованими до осі системи, проникають далі, але також відбиваються. Найменше гальмуються частинки з великими початковими радіальними швидкостями $\dot{r}_0 > 0$, спрямованими по радіусу. Як видно з рисунка, залежно від стартового радіуса починається проходження частинок через систему, коли початкові радіальні швидкості стають більше нуля. На рис. 3 за тих самих умов наведено швидкості частинок, що пройшли систему при $kz = 1,57$.

Якщо частинка стартує з малого радіуса (крива 1), вона не відбивається, а тільки гальмується залежно від величини початкової радіальної швидкості. Збільшення стартового радіуса (умови відповідають наведеним на рис. 2 графікам (криві 2, 3)) приводить до того, що частинки починають проходити тільки при $\dot{r}_0 > 0$. При ще більшій величині початкового радіуса частинки проходять при $\dot{r}_0 > 0,5$. Такі ж розрахунки проводили для частинки, у якої величина початкової енергії поперечного руху більша або менша за енергію спрямованого руху. Наприклад, на рис. 4 наведе-

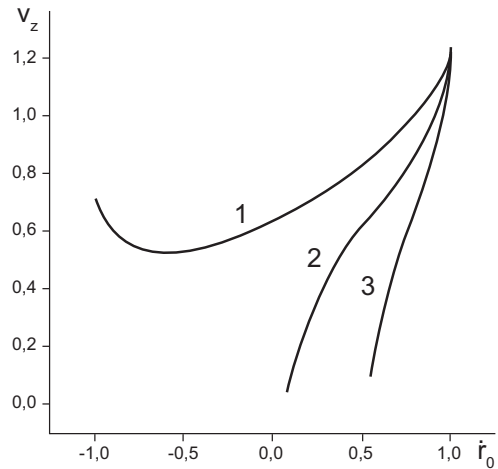


Рис. 3. Величина поздовжньої швидкості частинки на виході із системи ($kz = 1,57$) залежно від початкової радіальної швидкості, що стартує із різних радіусів: $kr_0 = 0, 1$ (1), $0,14$ (2), $0,18$ (3)

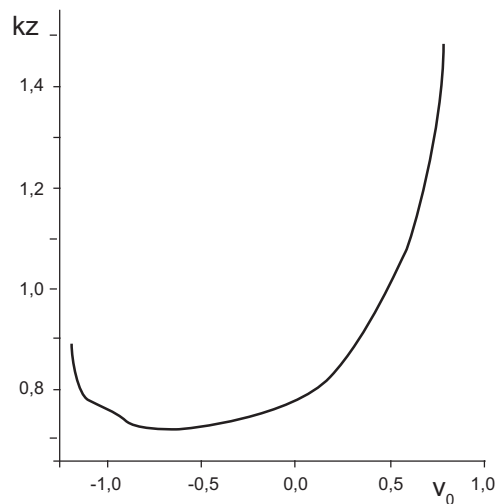


Рис. 4. Глибина проникнення частинок у магнітну конфігурацію залежно від початкової радіальної швидкості при $v_{\perp} = 1,2v_0$

но криву, яка визначає місця відбиття для частинки, у якої поперечна швидкість перевищує поздовжню у 1,2 раза.

Як і у попередньому випадку, частинки проходять через систему, коли $\dot{r}_0 > 0$. Але у цьому випадку проходження починається тільки після того, коли $\dot{r}_0 > 0,75$. У цілому характер залежності глибини проникнення частинки від початкової радіальної швидкості залишається однаковим з попереднім. Найсильніше гальмуються частинки, у яких велика початкова азимутальна швидкість. Частинки з вели-

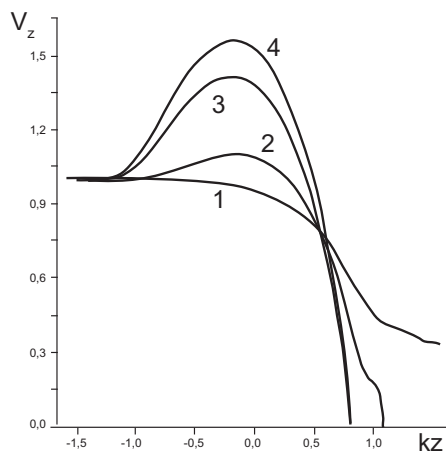


Рис. 5. Розподіл поздовжньої швидкості уздовж напрямку руху для частинок з різною початковою поперечною енергією: $E_{\perp} = 0, 0,0025$ (1), $0,25$ (2), $1,0$ (3), $1,44$ (4)

кою позитивною початковою радіальною швидкістю проникають далі і можуть пройти через систему. Величина початкової радіальної швидкості, з якої починається проходження, залежить від стартового радіуса.

У роботі [4] обговорено можливість застосування періодичної структури з гострокутовою геометрією магнітного поля для відбору виділеного ізотопу при поділі ізотопів методом іонного циклотронного резонансу (ЩР). Проведені у [5] числові розрахунки показують, якщо у налітаючому у систему потоці втримуються частинки з $v_{\perp} \sim v_0$ і $v_{\perp} \ll v_0$, то під час руху до центра системи (площини нульового магнітного поля) частинки зміщуються по радіусу так, що поблизу площини нульового магнітного поля відбувається поділ цих частинок. Ближче до осі рухаються частинки, у яких початкові поперечні швидкості були малі, а частинки з більшими початковими поперечними швидкостями зміщені до периферії. Обробка результатів розрахунків дозволяє доповнити наведені там залежності.

На рис. 5 наведено розподіл поздовжнього компонента швидкості v_z уздовж координати kz при різній величині початкової поперечної енергії.

Коли енергія поперечного руху мала, то величина поздовжньої швидкості в перетині $kz = 0$ менше початкової. При збільшенні початкової енергії поперечного руху відбувається збільшення поздовжньої швидкості так, що фактично вся енергія поперечного руху переходить в енергію поздовжнього руху. Потік частинок, що рухаються на великих радіусах, має досить гарну спрямованість. Як показують розрахунки,

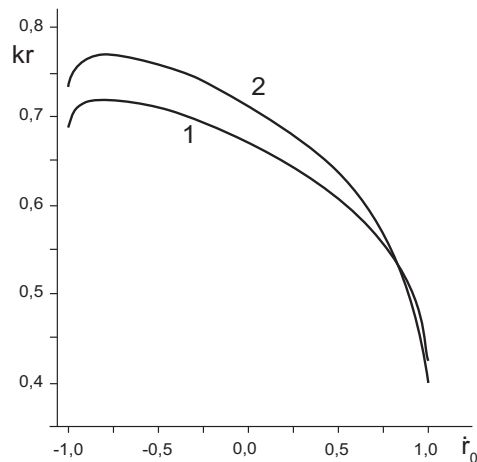


Рис. 6. Радіальний зсув частинок залежно від початкової радіальної швидкості при різних стартових радіусах: ($k_z = 0$) $kr_0 = 0,14$ (1), $0,18$ (2)

максимальна величина поздовжньої швидкості досягається при $kz = -0,25 \dots 0$ і потім починає спадати, а поперечна швидкість зростає. Цим визначається розкид по поперечних швидкостях у перетині $kz = 0$, де максимальний кут відхилення швидкості від осі системи $\sim 10\%$. На рис. 6 наведено залежність радіального зсуву частинки від початкової радіальної швидкості у центрі пастки $kz = 0$ при різних початкових радіусах.

Із цієї залежності видно, що більша частка частинок, що стартують із зазначеного інтервалу радіусів, зміщена в інтервал радіусів $0,55-0,75$. Найменший зсув у частинок з найбільшими початковими радіальними швидкостями $r_0 > 0$. В область радіусів $kr < 0,5$ попадають частинки, у яких початкові радіальні швидкості ~ 1 . У цю область можуть попадати частинки, які мали малі початкові поперечні складові швидкості, але стартували з відносно великого радіуса. Тому просторово відокремити такі частинки від частинок, що мають спочатку більші поперечні швидкості у цій області, не можна. Деякі можливості для такого поділу впливають із рис. 7, де показано величину радіальної швидкості залежно від радіального зсуву для частинок з великими початковими складовими швидкості в перетині $kz = 0$.

Як видно, тільки у частинок, найбільш зміщених по радіусу, радіальні компоненти швидкості позитивні. Частинки на менших радіусах у цьому перетині мають радіальні швидкості, спрямовані до осі системи. Величина швидкості більша тоді, коли менше зміщена частинка по радіусу. Радіальні швидкості части-

нок з малими початковими радіальними швидкостями в цій області завжди позитивні. У таблиці наведено значення радіальної швидкості для таких частинок при різних величинах параметрів.

Як видно з таблиці, область руху частинок з малими початковими поперечними швидкостями в околі $kz = 0$ не перекривається з областю, де рухаються частинки, що мали спочатку більші радіальні швидкості. Якщо виділити той інтервал радіусів, де радіальне положення частинок з великими і малими початковими радіальними швидкостями перекриваються, то з огляду на напрямок радіальної швидкості можна чекати, що такий поділ відбудеться після деякого зсуву цієї частини потоку у напрямку руху.

Таким чином, наявність великих поперечних складових швидкості у частинок, що надходять у систему, вносить помітні зміни в рух цих частинок усередині магнітної конфігурації. За виконання умови $\eta < \eta^{cr}$ частинки з однаковою початковою енергією поперечного руху можуть пройти крізь систему або відбитися залежно від співвідношення між початковими радіальною і азимутальною складовими швидкості. Частина частинок, що пройшла або відбилася, залежить ще і від стартового радіуса частинки. Найсильніше гальмуються частинки, що мають радіальні швидкості, спрямовані до осі системи і досить великі азимутальні складові швидкості. Такі частинки не проходять через систему. Частинки з більшими радіальними складовими швидкості значно менше гальмуються і можуть проходити систему. Цей результат варто враховувати при виборі оптимальних умов для інжекції частинок. Вибирати оптимальний радіус для інжекції частинок потрібно так, щоб частка частинок з більшими швидкостями, що пройшли, була по можливості менша. Розрахунки показують, що в центрі розглянутої магнітної конфігурації більша частина енергії зосереджена в поздовжньому русі частинок, і на більших радіусах у цій області рухається добре спрямований потік частинок, що не перекривається

Радіальний зсув і радіальна швидкість частинок у площині $kz = 0$

\dot{r}_0	$\dot{\varphi}_0$	r_0	\dot{r}	kr
-0,05	0	0,14	0,1545	0,257
0	0,089	0,14	0,144	0,254
-0,03	0,077	0,14	0,15	0,262
0,03	0,077	0,14	0,126	0,238
0,05	0	0,25	0,283	0,410
0,05	0	0,18	0,198	0,284
0,03	0,078	0,18	0,168	0,315
0	0,062	0,20	0,209	0,357

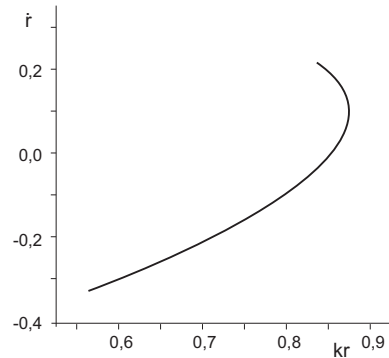


Рис. 7. Величина радіальної швидкості залежно від радіального зсуву частинки при $kz = 0$

з потоком частинок з малими поперечними швидкостями. Характеристики потоку у центрі системи показують, що така конфігурація магнітного поля може бути застосована при відборі виділеного ізотопу при поділі ізотопів методом ПЦР.

1. Н. Grad and R. van Norton, Plasma Fusion Suppl. Pt. 1, 61 (1962).
2. К.Д. Синельников, Н.А. Хижняк, Н.П. Репалов, и др. *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза* (Наукова Думка, Киев, 1965).
3. А.Г. Беликов, В.Г. Папкович, УФЖ **49**, 303 (2004).
4. А.М. Довбня, О.М. Єгоров, О.М. Швець і інші, Сер. Плазмова електроніка і нові методи прискорювання №4, 328 (2003).
5. А.Г. Беликов, ЖТФ **78**, 127 (2008).

Одержано 01.08.11

ДИНАМИКА ЧАСТИЦ С БОЛЬШИМИ НАЧАЛЬНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ОСТРОУГОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

А.Г. Беликов, В.Г. Папкович

Резюме

Рассмотрено движение заряженных частиц, инжектированных с большими начальными энергиями поперечного движения ($E_{\perp} \sim E_{\parallel}$) в систему с остроугольной геометрией магнитного поля. Получены зависимости глубины проникновения и прохождения через систему таких частиц при различных условиях на входе. Показано, что частицы с одинаковой начальной энергией поперечного движения могут пройти через систему или отразиться в зависимости от соотношения между начальной радиальной и азимутальной скоростями. Рассмотрены характеристики потока в центре системы в сечении, где магнитное поле обращается в нуль (скорость потока, радиальное смещение частиц относительно стартового радиуса, направленность потока) в зависимости от начальной радиальной скорости. Рассмотрены возможные применения результатов исследований.

DYNAMICS OF PARTICLES WITH HIGH INITIAL
TRANSVERSE VELOCITIES IN A MAGNETIC
FIELD WITH CUSP GEOMETRY

A.G. Belikov, V.G. Papkovich

Institute of Plasma Electronics and New Methods of Accelerating,
National Scientific Center
“Kharkiv Institute of Physics and Technology”
(1, Academichna Str., Kharkiv 61108, Ukraine;
e-mail: papkovich@kipt.kharkov.ua)

S u m m a r y

The motion of charged particles with high initial transverse energies ($E_{\perp} \sim E_{\parallel}$) injected into a region occupied by a magnetic field

with cusp geometry has been studied numerically. The dependence of the particle penetration depth on the initial conditions and the criterion for a particle to pass through the system are obtained. It is shown that the particles with the same initial transverse energy can either pass through the system or be reflected, depending on the ratio between their initial radial and azimuthal velocities. Some parameters of the particle flow – in particular, the particle velocity, the radial displacement of particles with respect to the starting radius, and the flow direction – at the system center, where the magnetic field vanishes, and their dependences on the initial radial velocity are analyzed. Possible applications of the results of studies are discussed.