

Т.М. ЧЕРЕДНИЧЕНКО,¹ І.Є. ГАРКУША,¹ В.О. МАХЛАЙ,¹ Д.Г. СОЛЯКОВ,¹
Ю.В. ПЕТРОВ,¹ В.В. ЧЕБОТАРЕВ,¹ М.С. ЛАДИГІНА,¹ А.К. МАРЧЕНКО,¹
В.В. СТАЛЬЦОВ,¹ Д.В. ЄЛІСЄЄВ,¹ В.М. АСТАШИНСЬКИЙ,² С.І. АНАНІН²

¹ Інститут фізики плазми, ННЦ ХФТІ

(Вул. Академічна, 1, Харків 61108; e-mail: cherednichenko@kipt.kharkov.ua)

² Інститут тепло- і масообміну ім. О.В. Ликова НАН Білорусії

(Мінськ, Білорусія)

ФОРМУВАННЯ ОБЛАСТІ КОМПРЕСІЇ В ПЛАЗМОВОМУ ПОТОЦІ МПК ЗА РІЗНИХ ПОЧАТКОВИХ УМОВ

УДК 533.95

Проаналізовані властивості зони компресії у самотиснених плазмових потоках, які генеруються магнітоплазмовим компресором (МПК). Основна увага приділялася виявленню залежностей основних параметрів плазми в потоках плазми, що стискаються, від початкових умов. Експериментально показано, що зменшення початкової концентрації робочого газу веде до збільшення густини плазми в зоні компресії. Проведено детальне дослідження просторових розподілів струмів, що протікають в плазмових потоках, за різних початкових концентрацій робочої речовини в каналі МПК. Встановлено, що зменшення початкової концентрації, в рамках даних експериментів, веде до витіснення струму із зони компресії.

Ключові слова: плазмодинаміка, магнітоплазмовий компресор, зона компресії.

1. Вступ

Дослідження самотиснених плазмових потоків великої густини становить інтерес як з точки зору розвитку фундаментальних принципів фізики плазми, так і з точки зору необхідності подальшого розвитку техніки експерименту в цій галузі [1–15]. Значна увага приділялася виявленню загальних особливостей формування і динаміки зони компресії в плазмових потоках, які генерувалися компресійними плазмодинамічними системами; вивченням цієї проблеми займалася велика кількість наукових груп впродовж багатьох років [2–7]. Магнітоплазмовий компресор (МПК) є плазмоди-

намічною системою, в якій спостерігається стійка зона компресії. В попередніх експериментах вивчені основні закономірності перебігу течії плазмового потоку за межами каналу МПК та проведено порівняння експериментально вимірних параметрів плазмових потоків з теоретичними оцінками для даних експериментальних умов [9, 12, 15]. Відомо [1, 15], що в потоках плазми, які стискаються, густина і температура суттєво залежать від початкових умов на вході в прискорювальний канал. Слід зазначити, що, незважаючи на величезний обсяг експериментальних, теоретичних і чисельних досліджень течії плазми в профільованих каналах до теперішнього часу не сформульовані чіткі критерії вибору початкових умов і геометрії каналу для отримання компресійних потоків з параметрами, близькими до теоретичної межі в зоні компресії. Тому головною задачею даної роботи було дослідження впливу початкових экс-

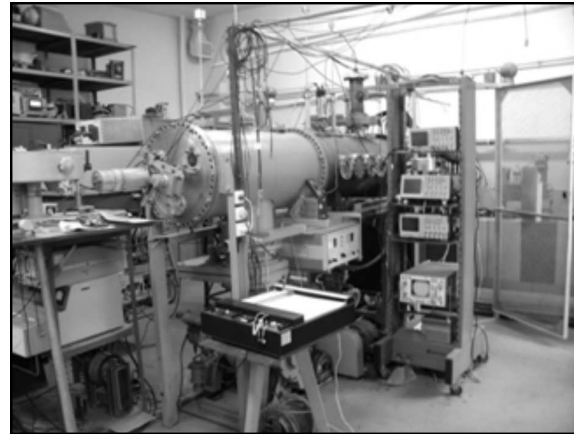
© Т.М. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, І.Є. ГАРКУША,
В.О. МАХЛАЙ, Д.Г. СОЛЯКОВ, Ю.В. ПЕТРОВ,
В.В. ЧЕБОТАРЕВ, М.С. ЛАДИГІНА,
А.К. МАРЧЕНКО, В.В. СТАЛЬЦОВ, Д.В. ЄЛІСЄЄВ,
В.М. АСТАШИНСЬКИЙ, С.І. АНАНІН, 2017

периментальних умов на процес формування зони компресії і параметри плазмового потоку, який генерується.

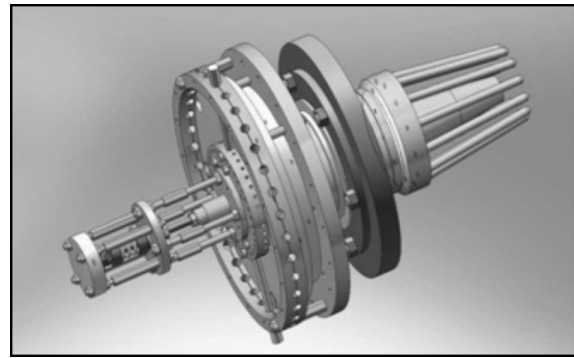
2. Експериментальна установка та методи діагностики

Експерименти проводилися на стенді МПК (рис. 1, а). Для реалізації компресійної течії плазми [8, 10, 12] геометрія каналу плазмодинамічного пристрою повинна відповідати ряду умов, а його ширина і середній радіус повинні зменшуватись. Прискорювальний канал МПК [1, 8–14] (рис. 1, б) утворений мідними коаксіальними електродами, зовнішній – анод і внутрішній – катод. Анод складається з двох частин: суцільної циліндричної форми діаметром 120 мм, довжиною 145 мм, і стрижневої конічної форми довжиною 147 мм і діаметром вихідної частини 75 мм. Суцільний катод має циліндричну частину довжиною 208 мм, діаметром 60 мм, і конічну частину довжиною 120 мм і діаметром вихідної частини 30 мм. Анод і катод розділені кільцевим ізолятором внутрішнім діаметром 42 мм і товщиною 20 мм. МПК встановлювався у вакуумній камері діаметром 45 см і довжиною 200 см. Енергоживлення розряду в МПК здійснювалося від ємнісного накопичувача ємністю 90 мкФ і максимальною напругою 30 кВ.

Експерименти проводилися в режимі залишкового газу, перед кожним розрядом вакуумна камера заповнювалася робочим газом з різними значеннями тиску. В ролі робочих газів використовувалися гелій і аргон. Вибір цих газів зумовлений тим, що їх атомна маса відрізняється в 10 разів. При зміні початкового тиску у вакуумній камері на порядок (наприклад, при роботі з гелієм при тиску 10 Торр та аргонем при тиску 1 Торр) можна було дослідити вплив початкової концентрації на процес формування зони компресії і параметри генерованого потоку за незмінних інтегральних масових витрат. Система діагностики експериментального стенда МПК включала в себе пояси Роговського, частотно-компенсовані дільники напруги, магнітні та електричні зонди, локальні рухливі калориметри, комплекс спектроскопічної діагностики. Густина плазми визначалася із Штарківського розширення спектральних ліній HeII 4685 Å, та ArII 4806 Å. Вимірювання проводилися уздовж осі плазмового потоку з роздільною здатністю у часі близько 0,5–0,6 мкс. Просторові розподіли вла-



а



б

Рис. 1. Загальний вигляд МПК (а) та електродна система прискорювача (б)

сного магнітного поля в плазмовому потоці вимірювалися за допомогою набору магнітних зондів максимальним діаметром 4 мм. Зонди розташовувалися таким чином, щоб вимірювати радіальний розподіл власного магнітного поля на різних відстанях від зрізу МПК. Таким чином, отримані двовимірні розподіли магнітного поля в потоці плазми $H_\varphi(r, z)$. Середня статистична похибка зондових вимірювань становила 10–15 %. З отриманих експериментально просторових розподілів магнітного поля, в припущенні аксіальної симетрії, розраховували просторові розподіли електричного струму в потоці, тобто лінії однакового струму $I(r, z) = 5rH_\varphi(r, z) = \text{const}$.

3. Результати експерименту

Усі експерименти були проведені за таких початкових умов: тиск у вакуумній камері становив 1 Торр та 10 Торр при роботі з аргонем та гелієм, відпо-

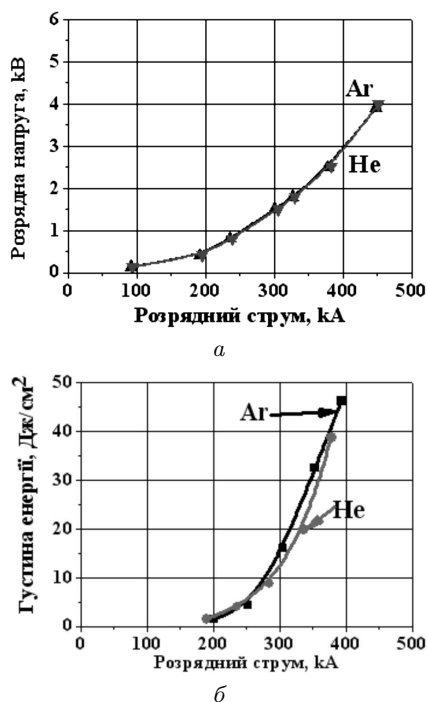


Рис. 2. ВАХ розряду (а) та густина енергії в потоці в залежності від розрядного струму (б)

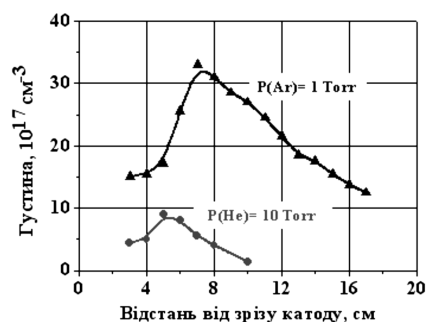


Рис. 3. Просторові залежності електронної густини потоку плазми вздовж осі при роботі з гелієм (10 Торр) та аргоном (1 Торр)

відно. Напруга на ємнісному накопичувачі дорівнювала 20 кВ. Максимальний розрядний струм в каналі МПК становив 450 кА, та не залежав від сорту газу (рис. 2, а). На рис. 2, б наведено залежності густини енергії в плазмовому потоці від величини розрядного струму, які виміряні на відстані 30 см від зрізу каналу МПК. Видно, що в цих двох режимах роботи залежності напруги на електроддах і густини енергії приосьової частини потоку від величини розрядного струму практично

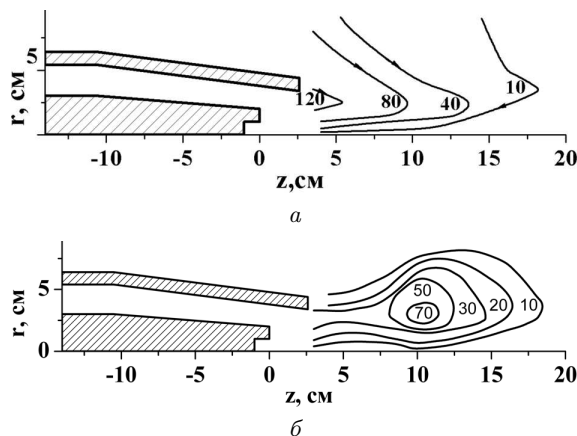


Рис. 4. Лінії рівного струму (одиниці виміру – кА), що протікають в плазмовому потоці МПК при роботі з гелієм (а) та аргоном (б)

збігаються. Розрядна напруга залежить від розрядного струму та масової витрати робочої речовини, як $U_p \approx \frac{J_p^3}{m}$, а швидкість потоку – $v \approx \frac{J_p^2}{m}$ [2, 5]. Це вказує на те, що при переході від гелію до аргону, але при різних значеннях початкового тиску, іншими словами, при збереженні інтегральних масових витрат, швидкість витікання плазми з каналу МПК залишається незмінною. З рівняння Бернуллі $\left(\frac{v^2}{2} + \int \frac{d\rho}{\rho} + \frac{H^2}{4\pi\rho} = \frac{H_0^2}{4\pi\rho_0}\right)$ [9–12] можна оцінити залежність максимальної величини густини плазми в зоні компресії від початкових умов розряду, таких як початкова концентрація робочого газу, початкова температура і розрядний струм в каналі МПК. Величина густини в зоні компресії: $n = n_0 \left[(\gamma - 1) \left(\frac{C_{A0}^2}{C_{T0}^2} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma-1}}$, де $C_{A0}^2 \sim \frac{H_0^2}{M_i n_0}$ та $C_{T0}^2 \sim \frac{T_0}{M_i}$ – альфвенівська і теплова швидкості на вході до прискорювального каналу, відповідно, n_0 – початкова концентрація робочого газу, H – власне магнітне поле плазмового потоку, v – швидкість потоку, ρ – густина. За умов адіабатичного стискання ($\gamma = 5/3$) максимальна густина плазми в зоні компресії залежить від початкової концентрації робочої речовини, як $n \sim \frac{H_0^3}{\sqrt{n_0 T_0^{3/2}}}$, де H_0 – величина власного магнітного поля у відноному перерізі каналу МПК, T_0 – початкова температура газу.

На рис. 3 наведено порівняння вимірювань густини вздовж осі потоку при роботі з гелієм і аргоном. Добре видно, що в гелієвій плазмі, коли

початковий тиск становив 10 Торр, максимальна густина плазми в області компресії дорівнювала $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. За умов збільшення атомної ваги робочої речовини (мається на увазі аргон) при одночасному зменшенні початкового тиску до 1 Торр зменшується початкова концентрація в 10 разів. В цьому випадку густина плазми в області компресії зростає в 3,6 раза порівняно з гелієвою плазмою та досягає $3,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. А середня довжина зони компресії при цьому збільшується в 1,5–2 рази. Для аналізу динаміки формування області компресії були вивчені просторові розподіли струмів, що протікають в плазмовому потоці, який генерується. Результати вимірювань для моменту часу $t = 10 \text{ мкс}$, який відповідає закінченню першого напівперіоду розрядного струму, наведені на рис. 4.

При роботі з гелієм, як видно з рис. 4, *a*, не реєструється чітко сформована область компресії. В плазмовому потоці відсутні тороїдальні вихори електричного струму, які є атрибутом сильного стиснення плазми [15]. Не спостерігається витіснення струму з приосьової частини плазмового потоку поблизу перерізу МПК. Струми виносу поширюються на 15–17 см від МПК. Загальна величина струмів виносу становить до 120 кА. А при переході до аргону, тобто змінивши початкову концентрацію робочого газу, до моменту закінчення першого напівперіоду розрядного струму в плазмовому потоці формується віялоподібний розподіл струму, який поширюється на 17–18 см від зрізу МПК. В приосьовій зоні на відстані 6–8 см від зрізу центрального електрода спостерігається витіснення магнітного поля, це відбувається саме в тій частині потоку, де і спостерігається збільшення густини плазмового потоку. Таким чином, просторові розподіли струму та пов'язані з ними просторові розподіли сили Ампера, а відповідно динаміка формування області компресії залежать від початкової концентрації робочого газу і не залежать від масових витрат.

4. Висновки

Досліджені особливості формування області стиснення плазмового потоку за межами каналу МПК при різних початкових умовах, за незмінної інтегральної масовій витраті робочої речовини в прискорювальному каналі. Це досягалося застосува-

нням робочої речовини з суттєво різною атомною масою: вибрано гелій з початковим тиском 10 Торр та аргон з тиском 1 Торр. Одночасна зміна сорту робочого газу з гелію на аргон та зміна початкового тиску дозволили зберегти незмінною інтегральну масову витрату робочої речовини, але суттєво змінити початкову концентрацію робочого газу. Це дало можливість дослідити залежність формування зони стиснення та параметрів плазмового потоку від початкової концентрації робочого газу.

Показано, що зміна початкової концентрації робочого газу при незмінних значеннях масових витрат не призводить до зміни інтегральних характеристик розряду (ВАХ) і густини енергії приосьової частини плазмового потоку.

Досліджено просторові розподіли струму, які протікають в плазмових потоках при різних початкових концентраціях робочої речовини в каналі МПК. Встановлено, що зменшення початкової концентрації, в рамках даних експериментів, призводить до істотної зміни просторового розподілу струмів, які протікають в плазмовому потоці. Зокрема відбувається генерація тороїдальних вихорів струму та витіснення струму з приосьової області. Внаслідок цього істотно змінюється просторовий розподіл сили Ампера в потоці. Це призводить до часткового гальмування потоку і його стиснення в напрямку осі системи [10].

Експериментально встановлено, що зменшення початкової концентрації робочого газу за інших незмінних умов: величин розрядного струму та інтегральних масових витрат призводить до збільшення густини плазми в зоні компресії. Зокрема, при зменшенні початкової концентрації на порядок густина потоку збільшується в 3,6 раз, а це, в свою чергу, пояснюється зміною розподілу електромагнітних сил в плазмовому потоці і добре узгоджується з результатами, які випливають із теоретичних оцінок на основі рівняння Бернуллі.

Робота виконана в рамках виконання дослідницьких проектів за конкурсом НАН України та НАН Білорусі 2015 р. проект 11-02-15.

1. А.И. Морозов. *Введение в плазмодинамику* (Физмалит, 2006).
2. Ю.В. Скворцов, В.С. Комельков, С.С. Церевитинов и др. Структура магнитных полей в плазменной струе с собственными токами. *ЖТФ*, **34** (6), 965 (1964).

3. А.К. Виноградова, А.И. Морозов. *Физика и применение плазменных ускорителей*, под ред. А.И. Морозова (Наука и техника, 1974), с. 103.
4. V.V. Sidnev, Yu.V. Skvortzov, V.G. Solovyeva et al. *Proc. of the XV Conf. on Phenomena in Ionized Gases* (Minsk, 1981), p. 903.
5. Г.А. Дьяконов, В.Б. Тихонов. Экспериментальное исследование влияния геометрии ускорительного канала и внешнего магнитного поля на режимы течения плазмы в коаксиальном квазистационарном плазменном ускорителе (КСПУ) типа П-50А. *Физика плазмы* **20** (6), 533 (1994).
6. А.Н. Козлов. Исследование приэлектродных процессов в квази-стационарных плазменных ускорителях с непроницаемыми электродами. *Физика плазмы* **38** (1), 15 (2012) [DOI: 10.1134/S1063780X11120051].
7. К.В. Брушлинский, А.Н. Заборов, А.Н. Козлов, А.И. Морозов, В.В. Савельев. Численное моделирование течений плазмы в КСПУ. *Физика плазмы* **16** (2), 147 (1990).
8. А.И. Морозов, Л.С. Соловьев. *Вопросы теории плазмы*, под ред. М.А. Леонтовича (Гоаатомиздат, 1974), с. 3.
9. I.E. Garkusha, V.V. Chebotarev, D.G. Solaykov, Yu.V. Petrov, M.S. Ladygina, A.K. Marchenko, V.V. Staltsov, D.V. Yelisyeyev. Compression zone of a magnetoplasma compressor as a source of extreme UV radiation. *Plasma Phys. Rep.*, **38**, 110 (2012) [DOI: 10.1134/S1063780X12010047].
10. A.K. Marchenko, M.S. Ladygina, I.E. Garkusha, Yu.V. Petrov, D.G. Solaykov, T.N. Cherednichenko, V.A. Makh-laj, V.V. Chebotarev, V.V. Staltsov, D.V. Yelisyeyev, V.I. Krauz. Compression zone formation in the plasma streams generated by MPC facility operating the gasses with sufficiently different mass. *Problems of Atomic Science and Technology* No. 6 (94), 83 (2014).
11. A.I. Morozov. The acceleration of a plasma by a magnetic field. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* **32**, 305 (1957).
12. V.V. Chebotarev, I.E. Garkusha, V.S. Ladygina, A.K. Marchenko, Yu.V. Petrov, D.G. Solaykov, V.I. Tereshin, S.A. Trubchaninov, A.V. Tsarenko, A. Hassanein. Investigation of pinching discharges in MPC device operating with nitrogen and xenon gases. *Czech. J. Phys.* **56**, 335 (2006) [DOI: 10.1007/s10582-006-0219-y].
13. D.G. Solaykov. High-power plasma dynamic systems of quasi-stationary type in IPP KIPT: Results and prospects. *Problems of Atomic Science and Technology* No.1 (95), 104 (2015).
14. V.V. Chebotarev, T.N. Cherednichenko, D.V. Eliseev, I.E. Garkusha, A.N. Kozlov, N.V. Kulik, M.S. Ladygina, A.K. Marchenko, Ya.I. Morgal, Yu.V. Petrov, D.G. Solaykov, V.V. Staltsov. MHD characteristics of compression zone in plasma stream generated by MPC. *Problems of Atomic Science and Technology* No. 6 (82), 123 (2012).
15. Т.М. Чередниченко, И.Е. Гаркуша, В.В. Чеботарев, Д.Г. Соляков, Ю.В. Петров, М.С. Лядыгина, Д.В. Елисейев, А.А. Чувило. Local magnetohydrodynamic characteristics of the plasma stream generated by MPC. *Acta Polytechnica* **53** (2), 131 (2013).
16. Д.Г. Соляков, Ю.В. Петров, И.Е. Гаркуша, В.В. Чеботарев, М.С. Лядыгина, Т.Н. Чередниченко, Я.И. Моргал, Н.В. Кулик, В.В. Стальцов, Д.В. Елисейев. Формирование зоны сжатия в плазменном потоке, генерируемом магнитоплазменным компрессором. *Физика плазмы* **39** (12), 1099 (2013) [DOI: 10.7868/S0367292113110085].

Одержано 20.11.15

T.M. Cherednychenko, I.E. Garkusha, V.A. Makh-lai, D.G. Solaykov, Yu.V. Petrov, V.V. Chebotarev, M.S. Ladygina, A.K. Marchenko, V.V. Staltsov, D.V. Yelisyeyev, V.M. Astashynskyy, S.I. Ananin

CREATION OF A COMPRESSION ZONE IN THE PLASMA STEAM MPC UNDER DIFFERENT INITIAL CONDITIONS

S u m m a r y

The analysis of fundamental properties of the compression zone in the self-compressed plasma streams generated by a magnetoplasma compressor (MPC) is carried out. The main attention is attended to the research of the dependences of basic plasma parameters in a compressed plasma stream depending on the initial conditions. It has been shown experimentally that the reduction of the initial concentration of a working gas leads to an increase of the plasma density in the compression zone. The detailed studies of the spatial distributions of currents in the plasma flows are fulfilled for different initial concentrations of a substance in the accelerating channel of MPC. Under the experiment conditions, it is found that a decrease of the initial concentration of a working gas leads to the displacement of the currents from the compression zone.