

В.Б. КОРОВІН, І.К. ТАРАСОВ, Я.Ф. ЛЕЛЕКО, Е.Л. СОРОКОВИЙ,
Ю.В. КОВТУН, О.М. ШАПОВАЛ, М.М. КОЗУЛЯ, О.А. ЛОЗІН, А.М. ТАРАСОВ,
Є.Д. КРАМСЬКИЙ, В.В. ФІЛІППОВ, О.В. ЄВСЮКОВ

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України
(Вул. Академічна, 1, Харків 61108; e-mail: korovin@kipt.kharkov.ua)

ДИНАМІКА ПОТЕНЦІАЛУ НЕЗАЗЕМЛЕНОЇ АНТЕНИ В ТОРСАТРОНІ УРАГАН-2М ПРОТЯГОМ ВЧ ІМПУЛЬСУ

УДК 533.9.03

У роботі показано, що рамкова ВЧ антена, за допомогою якої створюється первісна плазма в стелараторі Ураган-2М і яка електрично не з'єднана з корпусом установки, набуває як негативного, так і позитивного потенціалу, протягом ВЧ імпульсу. Проведено вивчення впливу на потенціал антени напруги живлення ВЧ генератора і тиску робочого газу. Показано зміну величини потенціалу антени за одночасної роботи двох ВЧ генераторів. Надано теоретичну оцінку впливу пондеромоторних сил на потенціал рамкової антени.

Ключові слова: стеларатор, торсатрон, високочастотний нагрів, електрони, що втікають.

1. Вступ

У стелараторі Ураган-2М (У-2М) [1, 2] створення та нагрівання плазми здійснюється ВЧ методами в іонно-циклотронному діапазоні частот (3–15 МГц) [3, 4]. Однією з головних відмінностей високочастотних (ВЧ) методів нагрівання плазми від інших є формування просторових зарядів позитивних іонів у ближній до антени зоні. Відомо, що при використанні ВЧ методів нагрівання плазми, паралельне електричне поле поблизу поверхонь ВЧ антен створює просторові ВЧ шари. Ці шари сприяють утворенню конвективних осередків, утворенню додаткових домішок через розпилення матері-

алу антени, а також до розсіювання потужності на межі плазмового шнура [5, 6]. Такі шари відомі давно, іноді їх називають ВЧ шарами ближнього поля, коли мова стосується антени. Місце розташування таких шарів може визначатися положенням лінії магнітного поля та антени. Потенціал ВЧ шара, відносно корпусу установки, залежить від сили струму в антені, тобто визначається рівнем ВЧ потужності, що вводиться в антену [7]. Великі квазістаціонарні електричні поля було виявлено ще у 30-х роках минулого століття, коли проводили вимірювання зондовим методом параметрів плазми, створеної ВЧ методом. Напруженість таких полів може досягати одиниць та десятків кіловольт на сантиметр. Результати вимірювань показали, що різниця потенціалів між плазмою і електродами може досягати величини порядку напруги, що прикладається до електродів [5, 8, 9].

Подібні шари у плазмі досліджувалися й в роботах [10, 11]. Про виникнення поблизу ВЧ антени суттєвих змін потенціалу йдеться у роботі [12]. У роботі [13] наведено дані про проведені вимірювання потенціалу плазми, які також підтвер-

Цитування: Коровін В.Б., Тарасов І.К., Лелеко Я.Ф., Сороковий Е.Л., Ковтун Ю.В., Шаповал О.М., Козуля М.М., Лозін О.А., Тарасов А.М., Крамський Є.Д., Філіппов В.В., Євсюков О.В. Динаміка потенціалу незаземленої антени в торсатроні УРАГАН-2М протягом ВЧ імпульсу. *Укр. фіз. журн.* **70**, № 3, 176 (2025).

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

джують наявність шару біля антени при використанні ВЧ потужності. Як правило, просторовий шар складається з кількох шарів [14]. Це відбувається завдяки ефекту випрямлення ВЧ напруги приелектродним шаром просторового заряду [15]. Шари просторових зарядів, що виникають мають яскраво виражену нелінійну вольт-амперну характеристику [16]. Коли електрони, потрапляють на поверхню антени, виходячи з приантенної області, тоді антена набуває негативного заряду. Власно, це і є початком формування просторового заряду. В свою чергу плазма стає позитивно зарядженою щодо антени. Можна сказати, що між антеною та плазмою утворюється ємність. Утворення такої ємності призводить до появи ємнісного зв'язку між антеною і плазмою, створюючи додатковий канал надходження ВЧ енергії до плазми. Тобто, виникає вже гібридний розряд (індуктивно-ємнісний) [17–19]. Внаслідок чого, ВЧ потужність в плазму може надходити по обох каналах розряду: по індуктивному та ємнісному. Однак, за межами цього шару просторового заряду плазма залишається квазинейтральною [20].

У стелараторі У-2М утворення просторового шару також спостерігається у області біля антени. Де також формується плазмовий конденсатор між поверхнею ВЧ антени і плазмою. Цей механізм описаний у роботі [13].

Наявність шарів просторового заряду з високою напругою негативно впливає на поверхню ВЧ антени. Відбувається розпилення матеріалу, з якого виготовлена антена, що призводить до появи у плазмі важких домішок [18, 21]. А це призводить до зміни концентрації та температури електронів у периферійній плазмі. Ці ефекти можуть призвести до деградації плазми в об'ємі утримання [6, 16]. Для стеларатора У-2М ця проблема тим більше важлива через відсутність дивертора, який міг би виводити результати взаємодії периферійного шару плазми зі стінкою камери та антеною. Проблема надходження важких домішок за рахунок розпилення матеріалу антени при ВЧ створенні плазми є дуже актуальною і потребує свого вирішення. Деякі варіанти можливих рішень наведено в роботах [13, 22, 23]. На розподіл постійного потенціалу також можуть впливати пондеромоторні сили, що діють на частинки плазми поблизу антени за наявності ВЧ поля [24, 25].

Дослідження динаміки негативного потенціалу рамкової антени на установках Ураган-3М (У-3М) і У-2М, дозволяють ширше трактувати отримані раніше результати про пробій та утримання плазми, а також про виникнення транспортних бар'єрів. Наприклад, на цих установках [26, 27] проводилися експерименти, пов'язані з подачею негативного потенціалу в периферійній області плазмового шнура для експериментального підтвердження можливості пригнічення потоків електронів, що втікають (ЕВ). Відмінність умов проведення експериментів щодо пригнічення ЕВ від виникнення потенціалу в результаті подачі ВЧ напруги на антену в тому, що в першому випадку (Ураган-3М [28]) потенціал подається безперервно, а в другому (Ураган-2М [29]) – лише протягом ВЧ імпульсу. Якщо у першому випадку пригнічення потоку ЕВ відбувалося на стадії його формування, то в іншому випадку потенціалу антени відбувається вже з сформованим потоком високошвидкісних електронів. З цієї причини існують значні відмінності щодо ефектів впливу потенціалу антени на електрони. Якщо в першому випадку спостерігається повне пригнічення (в межах точності наших вимірів), то в другому випадку має місце сильна взаємодія потоку ЕВ з плазмою, ВЧ полями та з потенціалом антени. Більш того, потік електронів, втративши швидкість протягом ВЧ імпульсу, може продовжувати іонізацію і після ВЧ імпульсу. Цей ефект міг би мати місце на стелараторі У-3М [28].

Що стосується вивчення впливу потенціалу антени на динаміку створеної плазми, слід зазначити, що ця тема привертала увагу і раніше [29, 30], але надалі розвитку не мала.

Пряме дослідження взаємодій просторового заряду з поверхнею ВЧ антени ускладнене через високу ВЧ потужність і напругу на антенах, і малі геометричні розміри самого шару. Тому будь-які нові способи вивчення просторового заряду важливі для повнішого розуміння взаємодії ВЧ антени з плазмою.

Метою даної роботи було дослідження динаміки постійної напруги між ВЧ антеною і корпусом установки без введення в плазму додаткових вимірювальних зондів та отримання залежності цієї напруги від таких параметрів експерименту як рівень ВЧ напруги на антені та тиск робочого газу.

Робота організована в такий спосіб. У секції 2 описано експериментальні умови та вимірювання,

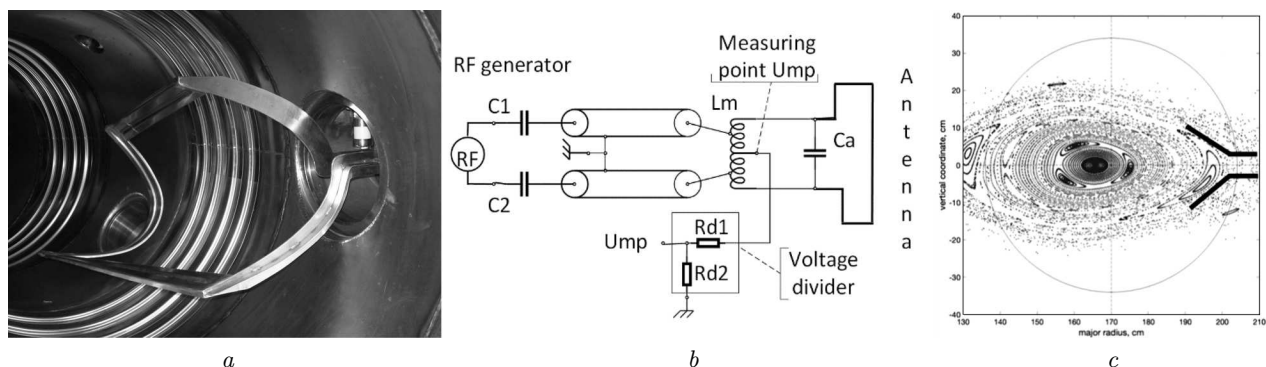


Рис. 1. Фото рамкової антени, встановленої в камері Ураган-2М (а). Принципова схема підключення ВЧ антени та проведення вимірювань U_{mp} (б). Схематичне розташування рамкової антени щодо розрахункових магнітних поверхонь у камері установки (с)

які було проведено. У секції 3 наведено результати вимірів, які було отримано в експериментах. Секція 4 присвячена теоретичному аналізу впливу пондеромоторних сил на розподіл постійного потенціалу поблизу антени. У секції 5 представлено висновки з проведених досліджень.

2. Обладнання та вимірювання

Ураган-2М [1] – стеларатор типу торсатрон з великим радіусом плазми $R = 170$ см, середнім значенням малого радіуса плазми $r_{p1} < 24$ см і тороїдальним магнітним полем $B_0 < 0,4$ Тл. Малий радіус вакуумної камери дорівнює 34 см. У торсатроні У-2М, як уже вказувалося вище, для створення та нагрівання плазми застосовується ВЧ метод [31, 32]. Детально механізми створення та нагрівання плазми в У-2М розглянуто у [3, 33]. При цьому використовувалися різні антени, у тому числі незаземлені антени рамкового типу [33–35]. Рамкова антена у У-2М використовується, переважно, для предіонізації, тобто для створення холодної плазми низької густини. Вихідна потужність ВЧ генератора, до якого підключена антена, в цьому випадку становить порядку 50 кВт. Розміри рамкової антени становлять 70 см у тороїдальному напрямку і 50 см у полоїдальному напрямку. Антена виготовлена з нержавіючої немагнітної сталі. Форма її провідників підігнана до форми останньої замкнутої магнітної поверхні торсатрона. Антена розташована на відстані 1 см від неї (рис. 1, а, б). Рамкова антена розташована із зовнішнього боку плазмового шнура у місці, де еліптичний переріз шнура орієнтований горизонтально [33].

Рамкова антена електрично не з'єднана з корпусом установки, має двополярний вхід, який добре підходить для підключення виходу двотактного ВЧ генератора Каскад. ВЧ генератори Каскад-1 та Каскад-2 є джерелами ВЧ електромагнітного поля, за допомогою якого створюється плазма [1, 36]. Це потужні імпульсні пристрої, зроблені за схемою двотактного автогенератора зі спільним катодом [37].

При роботі на симетричне навантаження (рамкову антену), в її середній точці ВЧ напруга дорівнює 0 В (при збалансованих плечах генератора). Тобто протягом ВЧ імпульсу генератора в цій точці ВЧ напруга практично не спостерігається, що зручно при вимірах постійної напруги.

При вивченні режиму створення плазми з використанням рамкової антени в торсатроні У-2М контролювалася напруга U_{mp} в середній точці узгоджувального пристрою, що є еквіпотенціальною середньої точкою незаземленої рамкової антени [38]. На рис. 1, б зображено схему проведення вимірювань. C_1 та C_2 – розділові конденсатори на виході ВЧ генератора, C_a – конденсатор антенного контуру, L_m – індуктивність узгоджувального пристрою для ВЧ антени, яка встановлена всередині вакуумної камери. Вимірювання ВЧ напруги здійснювалися ВЧ ємнісними дільниками напруги. Вимірювання напруги U_{mp} проводилися за допомогою резистивних дільників напруги R_{d1} та R_{d2} з вхідними опорами 15,1–57,6 кОм.

При ВЧ створенні плазми можна виділити три стадії, що відрізняються одна від одної як щодо розподілу електромагнітного поля, так і характером процесу іонізації [40]. Перша стадія – дохви-

льова (пробій нейтрального газу), коли густина плазми настільки низька, що слабо впливає на структуру електромагнітного поля. Друга стадія – стадія попередньої іонізації. На цій стадії можуть поширюватися хвилі, а густина плазми мала, порівняно з густиною нейтрального газу. Третя стадія – стадія створення плазми з високим ступенем іонізації [40].

У разі, коли створення та нагрівання плазми здійснюється за допомогою рамкової антени, після старту ВЧ імпульсу густина плазми наростає досить швидко. Це пов'язане з тим, що рамкова антена ефективно збуджує повільну хвилю, отже дві стадії створення плазми – дохвильова і передіонізація – проходять протягом короткого проміжку часу [40, 41].

В рамках цієї роботи ми розглядатимемо процеси, які відносяться, в основному, до першої стадії.

3. Експериментальні результати

Під час проведення вимірювань було встановлено, що впродовж роботи ВЧ генератора при створенні плазми, постійна напруга U_{mp} у точці вимірювань (див. рис. 1, *b*) протягом ВЧ імпульсу має як позитивну, так і від'ємну складову (див. рис. 2). До того ж це спостерігалось як за малих величин магнітних полів $B_0 = 0,01$ Тл (режим чистки камери), так і при $B_0 = 0,33$ Тл.

У роботі [38] було зроблено докладний аналіз причин виникнення позитивної складової постійної напруги на антені. Як виявилось, основна причина появи позитивної складової постійної напруги на антені – це схемо-технічні особливості ВЧ генератора Каскад – розряд розділового конденсатора генератора через навантаження (плазму) під час ввімкнення генератора. Там також наведено результати дослідження цієї напруги від напруги на анодах ламп ВЧ генератора та від тиску робочого газу в камері установки. Висловлено припущення, що усунення позитивної складової постійної напруги на антені може сприяти скороченню пробією робочого газу. Запропоновано рішення щодо усунення позитивного викиду постійної напруги U_{mp} на початку ВЧ імпульсу. Тому, у цій роботі розглядається лише негативна складова потенціалу антени щодо корпусу установки.

Далі нами наводяться дані щодо дослідження динаміки негативної складової потенціалу антени відносно корпусу установки.

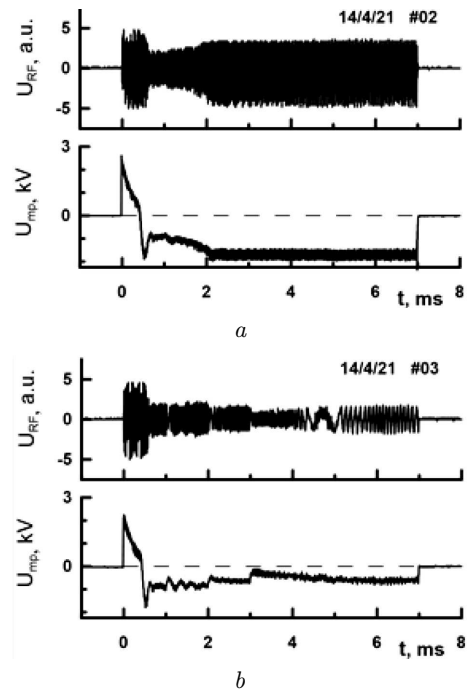


Рис. 2. Залежність ВЧ напруги на відведеннях антени (*a*) і потенціалу антени U_{mp} (*b*) від часу. U_{K1} і U_{K2} – напруги живлення ВЧ генераторів. $P = 4 \cdot 10^{-4}$ Торр, $B_0 = 0,01$ Тл, (*a*) $U_{K2} = 4$ кВ. (*b*) $U_{K2} = 4$ кВ (0–7 мс), $U_{K1} = 5$ кВ (2–7 мс)

На рис. 2 наведено графіки зміни величини ВЧ напруги на вводах рамкової антени та напруги U_{mp} в середній точці. Причому, верхня пара графіків (рис. 2, *a*) відповідає режиму роботи, коли плазма створюється за допомогою рамкової антени без подальшого нагрівання другим ВЧ генератором. На графіках видно, що зміни постійного потенціалу антени U_{mp} відображають зміни ВЧ напруги на антені.

Приблизно через 0,5 мс після початку ВЧ імпульсу відбувається різке зниження ВЧ напруги на антені.

На цьому етапі відбувається іонізація молекули робочого газу (водню), що здійснюється електронами, які отримують енергію, необхідну для іонізації в поздовжньому електричному ВЧ-полі $E_{\parallel} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}_0 / B_0$ [37]. Оскільки на стадії ВЧ-пробією хвилі не поширюються в плазмі ($k_{\perp} r_{pl} < 1$, де r_{pl} – радіус плазми, $k_{\perp}$ – поперечна складова хвильового вектора), то ВЧ-потенціал малий скрізь, крім області поблизу антени. Тому електрони, які народжуються всередині області ближнього поля антени

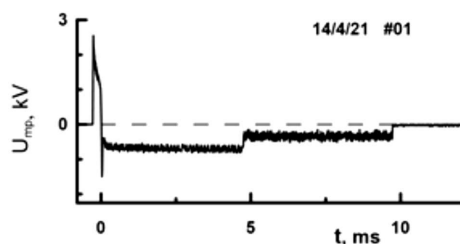


Рис. 3. Динаміка потенціалу антени U_{mp} при роботі одного та одночасно двох (5–10 мс) ВЧ генераторів. $U_{K2} = 4$ кВ (0–10 мс). $U_{K1} = 5$ кВ (5–10 мс). $P = 3 \cdot 10^{-4}$ Торр – водень. $B_0 = 0,01$ Тл

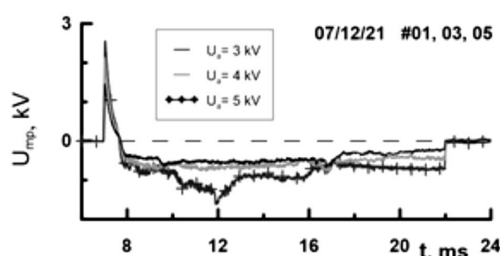


Рис. 4. Динаміка потенціалу антени U_{mp} від анодної напруги ВЧ генератора. $P = 6,5 \cdot 10^{-5}$ Торр – водень. $B_0 = 0,33$ Тл

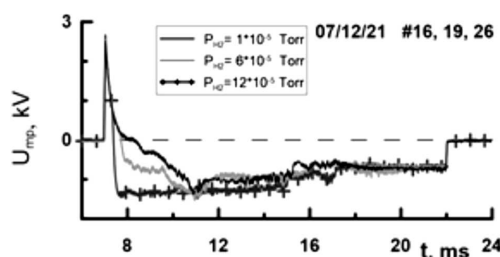


Рис. 5. Динаміка потенціалу антени U_{mp} для трьох величин тиску (водень). $B_0 = 0,33$ Тл, $U_{K2} = 5$ кВ

ни, мають значну енергію осциляцій і можуть іонізувати нейтральний газ та ініціювати лавинний пробій. При іонізації газу з'являється випромінювання H_α [38]. Плазма, що з'явилася, вносить свій опір в антенний контур, і тим самим навантажує антену і, відповідно, ВЧ генератор. Експериментально встановлено, що ВЧ пробій і передіонізація газу відбуваються лише за певних значень ВЧ-струму антени [39]. Струм в антені залежить від напруги на її відведеннях та від опору навантаження, який вносить плазма. Чим більше навантаження, тим менше рівень U_{mp} . Спостерігається, що рівень ВЧ напруги після пробою поступово збільшується, тобто вплив плазми на антену (наванта-

ження ВЧ генератора) зменшується. Зменшується зв'язок антени з плазмою та її параметри деградує. Це може статися тому, що дедалі більше електронів плазми потрапляє на поверхню антени, відповідно, рівень U_{mp} збільшується.

Графік залежності потенціалу антени (див. рис. 2, б) відповідає режиму, коли після створення первісної плазми одним ВЧ генератором, за допомогою рамкової антени, нагрівання плазми здійснювалося другим ВЧ генератором за допомогою іншої антени – двонапіввиткової [3, 44].

Після пробою є деяке плато величини U_{mp} . Потім відбувається зменшення ВЧ напруги, на 1-й, 2-й і 3-й мс, викликане включенням другого ВЧ генератора зі ступінчастим підвищенням напруги. Цьому відповідає таке ж різке ступінчасте зменшення U_{mp} . При цьому відбувається збільшення навантаження рамкової антени плазмою [43]. На обох графіках залежності потенціалу антени (див. рис. 2, а і б) видно, що величина U_{mp} пов'язана з рівнем ВЧ напруги.

На рис. 3 показано зміну U_{mp} у режимі, при якому протягом перших 5 мс працює один генератор Каскад-2 на рамкову антену, яка створює попередню плазму малої густини.

Негативний потенціал антени при цьому максимальний. На 5-й мс включається ще один генератор Каскад-1, навантажений на двополувиткову антену, і на плазму впливають одночасно два ВЧ поля від двох антен. Внаслідок чого підвищується густина плазми. І починаючи з цього моменту, постійний потенціал на антені різко знижується і залишається практично незмінним.

У роботі [42] наведено величину потенціалу рамкової антени в торсатроні У-3М. При подачі на антену 2 кВ ВЧ напруги її постійний негативний потенціал досягав 1 кВ.

Якщо розглядати область біля антени як приелектродний шар у разі ємнісного ВЧ розряду, то абсолютне значення стаціонарного падіння потенціалу в таких приелектродних шарах може досягати величини порядку амплітуди прикладеної ВЧ напруги [5, 15].

Також було проведено вивчення впливу напруги на анодах ламп ВЧ генератора (рис. 4) та тиску робочого газу (див. рис. 5) на зміни потенціалу рамкової антени. Плазма створювалася за допомогою ВЧ генератора, навантаженого на рамкову антену 7–22 мс. На 15 мс включався другий ВЧ генера-

тор, навантажений на двохнапіввиткову антену, зі ступінчастим збільшенням анодної напруги на генераторі на 16 та 17 мс. В обох випадках перші 8 мс вплив на плазму здійснювався лише за допомогою рамкової антени. Після цього підключався вплив на плазму ВЧ поля від другої антени (заземленої), яка продовжувала роботу і після вимкнення рамкової антени на 22 мс.

Як видно з графіків (див. рис. 4), зі зростанням анодної напруги відбувається збільшення негативного потенціалу антени U_{mp} , причому протягом усього ВЧ імпульсу.

На рис. 5 видно, що зміна тиску також впливає на величину негативного потенціалу. Зі збільшенням тиску робочого газу збільшується кількість активних електронів, які потрапляють на поверхню антени. А це призводить до збільшення постійної негативної напруги на антені.

На рис. 6 та 7 чітко видно, що випромінювання лінії H_{β} з'являється в момент t_1 , коли антена вже має негативний потенціал U_{mp} . Подальша зміна його величини залежить від тиску. У точці t_2 знаходиться екстремум негативної амплітуди U_{mp} . У момент часу t_3 з'являється випромінювання лінії вуглецю СІІ (229,7 нм), а інтенсивність випромінювання H_{β} досягає свого максимуму.

Також безпосередньо перед появою випромінювання лінії іона СІІ (229,7 нм) спостерігалися найбільші негативні піки потенціалу антени (точка t_2). Також можна помітити, що такі піки негативного потенціалу (точка t_2 на графіках) фіксуються в момент максимальної швидкості наростання інтенсивності випромінювання H_{β} і практично збігаються з моментом появи сигналу випромінювання СІІ.

Для досягнення пробою нейтрального газу необхідна наявність у структурі ВЧ поля, що випромінюється антеною, позовжньої (вздовж магнітних ліній) електричної складової, оскільки вона викликає сильніші електронні коливання, ніж інші компоненти ВЧ поля. А величина цієї складової максимальна в ближній зоні антени. Це означає, що і пробій ініціюється поблизу антени, тому частина швидких енергетичних електронів, що утворилися, потрапляє на поверхню антени.

На рис. 8 наведено реалізацію сценарію ВЧ пробою при підвищеному тиску. При цьому протягом ВЧ імпульсу роботи рамкової антени величина U_{mp} практично була постійною, досягнувши сво-

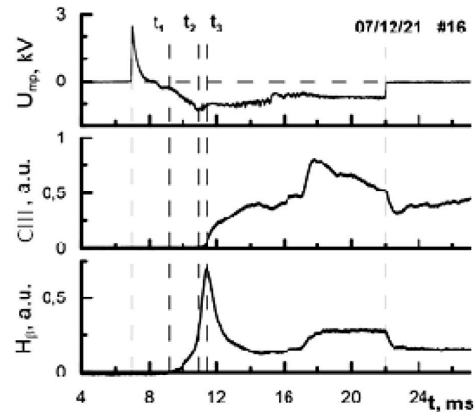


Рис. 6. Часова залежність постійної напруги на антені U_{mp} , лінії вуглецю СІІ (229,7 нм) та лінії H_{β} при $B_0 = 0,33$ Тл, $P = 1 \cdot 10^{-5}$ Торр

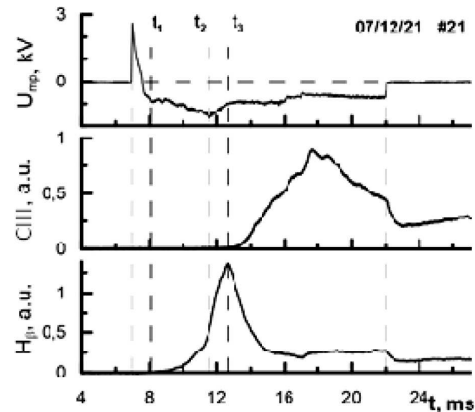


Рис. 7. Часова залежність постійної напруги на антені U_{mp} , лінії вуглецю СІІ (229,7 нм) та лінії H_{β} при $B_0 = 0,33$ Тл, $P = 8 \cdot 10^{-5}$ Торр

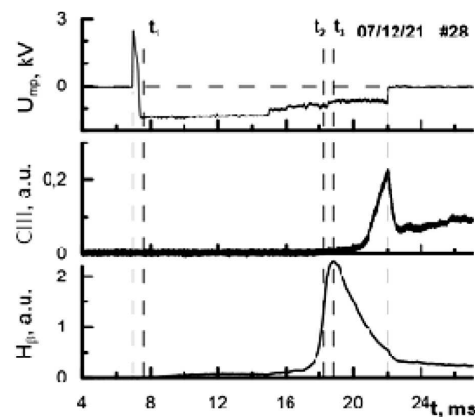


Рис. 8. Залежність постійної напруги на антені U_{mp} , лінії вуглецю СІІ (229,7 нм) та лінії H_{β} при $B_0 = 0,33$ Тл, $P = 1,7 \cdot 10^{-4}$ Торр

го негативного максимуму ще до появи сигналу H_β . А ВЧ пробій (t_2 , t_3) стався вже під час роботи другої ВЧ антени (двонапіввиткової). У цьому випадку зафіксований і максимум інтенсивності випромінювання H_β в усіх експериментах цієї серії імпульсів. Це режим слабоіонізованої плазми при підвищеному тиску, коли ВЧ пробій ініціюється поступово поблизу поверхні антени. Внаслідок цього максимальна кількість електронів потрапляє на її поверхню. У той час, як у випадках, наведених на рис. 6, 7, перед появою випромінювання H_β , рівень постійної негативної напруги на антені в два-три рази менший за його максимальне значення в цьому ж розряді.

При аналізі залежності величини піка негативного потенціалу антени протягом ВЧ імпульсу від тиску видно, що зі зростанням тиску його величина збільшується. А свого абсолютного максимуму пік потенціалу досягає за тиску $1 \cdot 10^{-4}$ Торр.

4. Вплив пондеромоторних сил на потенціал рамкової антени. Теоретичний розгляд питання

Метою цього теоретичного дослідження є оцінка впливу пондеромоторних сил на постійний потенціал антени та визначення його частини, яка може бути зумовлена пондеромоторними ефектами у будь-який момент часу. Як вказувалося вище, У-2М для створення і нагрівання водневої плазми ВЧ-полями в області альфвенівських частот $\omega \lesssim \omega_{ci}$ (ω – частота ВЧ генератора, $\omega_{ci} = eB_0/m_i c$ – циклотронна частота іонів, e – елементарний заряд, B_0 – зовнішнє магнітне поле, m_i – маса іонів, c – швидкість світла) використовується неекранована рамкова антена. Провідники антени, які орієнтовано уздовж магнітного поля, збуджують повільну магнітозвукову хвилю (див. рис. 1, а, с). Розрахунковий максимум генерації знаходиться при $l = 11$ [45], де l – тороїдальне хвильове число. А провідники, які орієнтовано у поперечному напрямку, збуджують переважно швидку магнітозвукову хвилю. В цьому випадку максимуму генерації відповідають $l = 8 - 11,26$ [45].

Для оцінок були використані такі параметри: $B_0 = 7$ кГс, $n_e = 10^{10}$ см $^{-3}$, $T_e = 50$ еВ, $T_i = 10$ еВ, $\omega = 5,5 \cdot 10^7$ с $^{-1}$, $l = 10$, де n_e – густина електронів, T_e і T_i – температури електронів та іонів. Такі параметри можуть бути релевантними у майбутніх експериментах.

Для розрахунків була використана декартова система координат: вісь z спрямована вздовж ліній магнітного поля, вісь y спрямована вздовж провідників антени, які перпендикулярні магнітному полю, вісь x перпендикулярна до площини антени (антена вважається плоскою). Як відомо, на частинки плазми сорту α поблизу джерела електромагнітного випромінювання в магнітному полі ($\omega_{c\alpha} \gtrsim \omega$, $\omega_{c\alpha}$ – циклотронна частота частинок сорту α) уздовж магнітних силових ліній (z напрямом) діє пондеромоторна сила [24, 25, 46]:

$$F_{z\alpha} = -\frac{e_\alpha^2}{4m_\alpha\omega^2} \frac{\partial}{\partial z} E_z E_z^* + \frac{e_\alpha^2}{4m_\alpha(\omega_{c\alpha}^2 - \omega^2)} \times \times \frac{\partial}{\partial z} \left\{ E_x E_x^* + E_y E_y^* - 2 \frac{\omega_{c\alpha}}{\omega} \text{Re}(i E_x E_y^*) \right\}, \quad (1)$$

де $E_{x,y,z}$ – амплітуди компонент електричного ВЧ поля поблизу джерела випромінювання, e_α і m_α – заряд і маса частинок сорту α .

Вираз (1) можна переписати у вигляді:

$$F_{z\alpha} = -\frac{\partial}{\partial z} \Psi_\alpha, \quad (2)$$

де

$$\Psi_{z\alpha} = -\frac{e_\alpha^2}{4m_\alpha\omega^2} E_z E_z^* + \frac{e_\alpha^2}{4m_\alpha(\omega_{c\alpha}^2 - \omega^2)} \times \times \left\{ E_x E_x^* + E_y E_y^* - 2 \frac{\omega_{c\alpha}}{\omega} \text{Re}(i E_x E_y^*) \right\} \quad (3)$$

– пондеромоторний потенціал, що діє на частинки сорту α .

Розрахуємо пондеромоторний потенціал на позовдовжніх і поперечних по відношенню до зовнішнього магнітного поля провідниках рамкової антени. За допомогою дисперсійного рівняння [47]

$$(N^2 \delta_{ij} - N_i N_j - \varepsilon_{ij}) E_j = 0, \quad (4)$$

знайдемо зв'язок між компонентами електромагнітного поля:

$$\frac{E_x}{\Delta_x} = \frac{E_y}{\Delta_y} = \frac{E_z}{\Delta_z}, \quad (5)$$

де

$$\Delta_x = (N^2 - \varepsilon_3) N_x N_y + i \varepsilon_2 (N_x^2 + N_y^2), \quad (6)$$

$$\Delta_y = N^2 N_y^2 - \varepsilon_3 (N_z^2 + N_y^2) - \varepsilon_1 (N_x^2 + N_y^2), \quad (7)$$

$$\Delta_z = ((N^2 - \varepsilon_1) N_y + i \varepsilon_2 N_x) N_z, \quad (8)$$

ε_{ij} – тензор діелектричної проникності плазми, ε_1 , ε_2 і ε_3 – компоненти цього тензора, N – показник заломлення хвилі, $N_{x,y,z}$ – відповідні компоненти показника заломлення, δ_{ij} – символ Кронекера. У загальному випадку вирази для компонент тензора діелектричної проникності плазми дорівнюють

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{ci}^2 - \omega^2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\omega_{pi}^2 \omega}{\omega_{ci}(\omega_{ci}^2 - \omega^2)},$$

$$\varepsilon_3 = 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{k_{\parallel}^2 v_{Te}^2} (1 + i\sqrt{\pi} z_e W(z_e)),$$

де

$$W(z_e) = e^{-z_e^2} \left(1 + \frac{2i}{\sqrt{\pi}} \int_0^{z_e} e^{t^2} dt \right), \quad z_e = \frac{\omega}{k_{\parallel} v_{Te}}.$$

Для швидкої хвилі, яку збуджують поперечні провідники, у випадку $N_y = 0$, маємо

$$\frac{E_x}{E_y} = \frac{\Delta_x}{\Delta_y} = \frac{-i\varepsilon_2(\varepsilon_3 - N_x^2)}{(\varepsilon_1 - N_z^2)(\varepsilon_3 - N_x^2) - N_x^2 N_z^2}, \quad (9)$$

$$\frac{E_z}{E_y} = \frac{\Delta_z}{\Delta_y} = \frac{i\varepsilon_2 N_x N_z}{(\varepsilon_1 - N_z^2)(\varepsilon_3 - N_x^2) - N_x^2 N_z^2}, \quad (10)$$

де $N_z = lc/(R_0 \omega)$, а N_x , один з коренів дисперсійного рівняння [47]

$$\varepsilon_1 N_x^4 + [(N_z^2 - \varepsilon_1)(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \varepsilon_2^2] N_x^2 + \varepsilon_3 [(N_z^2 - \varepsilon_1)^2 - \varepsilon_2^2] = 0, \quad (11)$$

наближено визначається виразом

$$N_{\perp F}^2 \approx \frac{(\varepsilon_1 - N_{\parallel}^2)^2 - \varepsilon_2^2}{\varepsilon_1 - N_{\parallel}^2}. \quad (12)$$

На рис. 9 і 10 показано залежності відношення амплітуд компонент електричного поля швидкої хвилі від магнітного поля поблизу області іонного циклотронного резонансу ($B_{ci} = 0,81575B_0$) та у дрібнішому масштабі при $0,8 \lesssim B/B_0 \lesssim 1,05$ для випадку $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ і $l = 10$. Поблизу резонансу x і z компоненти електричного ВЧ поля виявляються порядку y компоненти, а далеко від резонансу значно менше її. На рис. 10 залежності $\text{Re}(E_x/E_y)$ та $\text{Im}(E_z/E_y) \approx 0$ видні як одна лінія.

На рис. 11 і 12 показано залежності пондеромоторного потенціалу, який збуджується швидкою

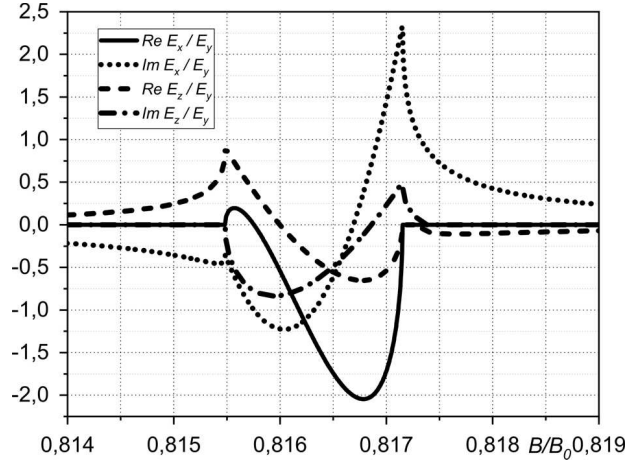


Рис. 9. Залежності відношення амплітуд компонент електричного поля швидкої хвилі від магнітного поля поблизу області іонного циклотронного резонансу ($B_{ci} = 0,81575B_0$) для випадку $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ і $l = 10$

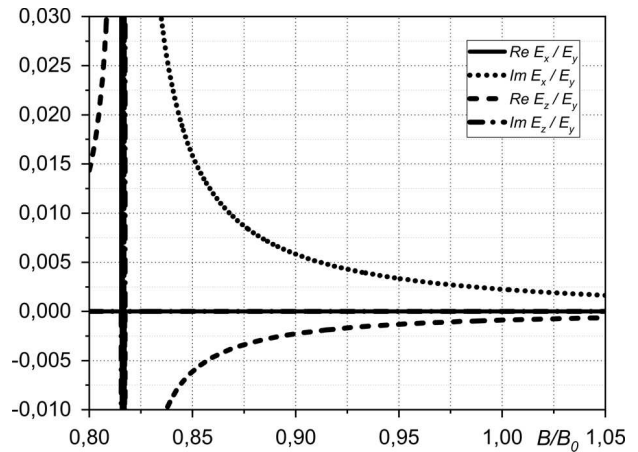


Рис. 10. Залежності відношення амплітуд компонент електричного поля швидкої хвилі від магнітного поля для випадку $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ і $l = 10$

хвилею і діє на іони і електрони, від магнітного поля поблизу області іонного циклотронного резонансу ($B_{ci} = 0,81575B_0$) та у дрібнішому масштабі при $0,8 \lesssim B/B_0 \lesssim 1,05$ для випадку $E_y = 30 \text{ В}$, $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ і $l = 10$. Величина електричного поля була оцінена за допомогою співвідношення $E_y = U_{\sim}/L$, де $U_{\sim}$ – амплітуда прикладеної до антени ВЧ напруги, L – сумарна довжина провідників антени. В цьому випадку $U_{\sim} = 7,2 \text{ кВ}$, а $L = 240 \text{ см}$. Поблизу резонансу пондеромоторний потенціал, який діє на електрони, досягає величин

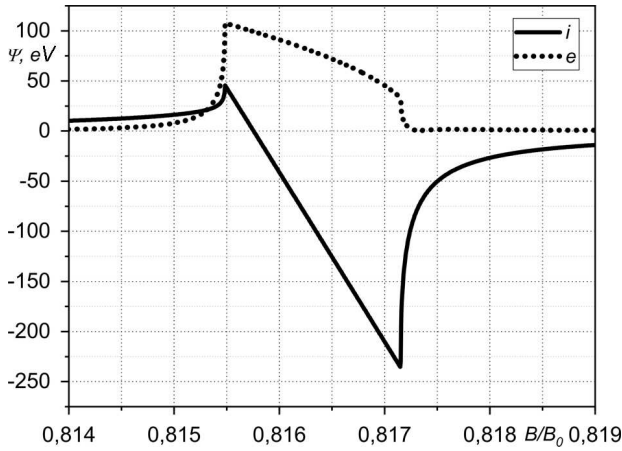


Рис. 11. Залежності пондеромоторного потенціалу, який збуджується швидкою хвилею, від магнітного поля поблизу області іонного циклотронного резонансу ($B_{ci} = 0,81575B_0$) для випадку $E_y = 30$ В, $n = 10^{10}$ см $^{-3}$ і $l = 10$

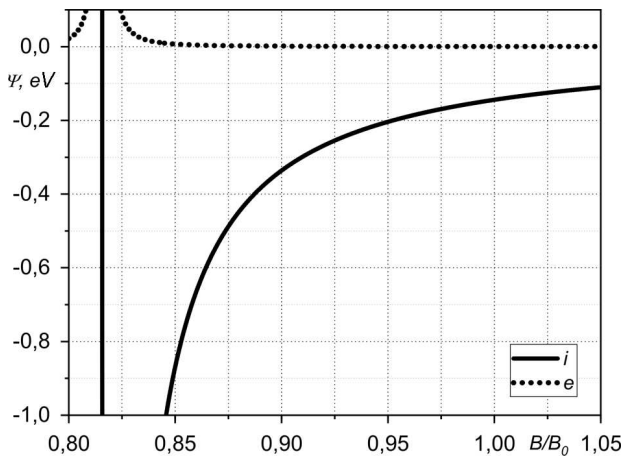


Рис. 12. Залежності пондеромоторного потенціалу, який збуджується швидкою хвилею, від магнітного поля для випадку $E_y = 30$ В, $n = 10^{10}$ см $^{-3}$ і $l = 10$

≈ 100 еВ, а у випадку іонів ≈ -200 еВ. Причому для області ($B \succ B_{ci}$) пондеромоторний потенціал має різні знаки при дії на іони і електрони. Далеко від резонансу величини потенціалу малі.

Для випадку повільної хвилі, яку збуджують поздовжні силовими лініями магнітного поля провідники, з виразів (5)–(8) знайдемо зв'язок між компонентами електричного ВЧ поля при $N_y = 0$

$$\frac{E_x}{E_z} = \frac{\Delta_x}{\Delta_z} = \frac{N_x^2 - \varepsilon_3}{N_x N_z}, \quad (13)$$

$$\frac{E_y}{E_z} = \frac{\Delta_y}{\Delta_z} = \frac{(\varepsilon_1 - N_z^2)(\varepsilon_3 - N_x^2) - N_x^2 N_z^2}{i\varepsilon_2 N_x N_z}, \quad (14)$$

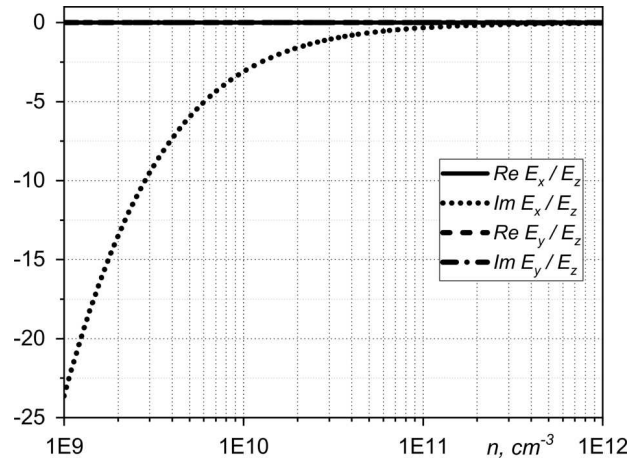


Рис. 13. Залежності відношення амплітуд компонент електричного поля повільної хвилі від густини плазми для випадку $B = B_0$ і $l = 10$

де N_x , інший з коренів дисперсійного рівняння (11), наближено визначається як

$$N_{\perp S}^2 \approx -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} (N_{\parallel}^2 - \varepsilon_1). \quad (15)$$

На рис. 13 показано залежності відношення амплітуд компонент електричного поля повільної хвилі від густини плазми для випадку $B = B_0$ і $l = 10$. Вибір залежності визначається тим, що для поздовжніх провідників, які спрямовані майже уздовж магнітних силових ліній, магнітне поле змінюється незначно на відміну від поперечних провідників, які майже перпендикулярні силовим лініям магнітного поля. Уявна частина x компоненти електричного поля зростає при зменшенні густини плазми і стає багато більше поздовжньої компоненти при $n = 10^{10}$ см $^{-3}$. Іншими трьома компонентами можна знехтувати, вони малі і на графіку зливаються до однієї лінії.

На рис. 14 показано залежності пондеромоторного потенціалу, який збуджується повільною хвилею і діє на іони і електрони, від густини плазми для випадку $B = B_0$ і $l = 10$. Величина пондеромоторного потенціалу, який діє на електрони, не залежить від густини і виявляється рівною ≈ 130 еВ. Це пов'язано з тим, що основний внесок в електронний пондеромоторний потенціал вносить перший доданок з (3), який не залежить від густини. Другий доданок в разі електронів пропорційний $\sim \omega/\omega_{ce} \ll 1$ в порівнянні з першим.

Іонний пондеромоторний потенціал стає помітним при $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ і зменшується до $\approx -80 \text{ eV}$ при $n = 10^9 \text{ см}^{-3}$. У разі іонів основний внесок вносить другий доданок з (3), який збільшується при збільшенні x компоненти електричного поля, перший же доданок є малим, оскільки має порядок $\sim m_e/m_i$ по відношенню до першого електронного доданку.

Для якісного пояснення впливу пондеромоторних сил на параметри плазми у шарі просторового заряду поблизу антени скористаємося стаціонарними гідродинамічними рівняннями. Рівняння руху електронів, якщо знехтувати складовими, які пропорційні $\sim m_e/m_i$, набуває вигляду

$$0 = e \frac{\partial}{\partial z} \varphi - \frac{T_e}{n_e} \frac{\partial}{\partial z} n_e - \frac{\partial}{\partial z} \Psi_e. \quad (16)$$

де φ – електричний потенціал. Після інтегрування отримаємо формулу Больцмана з урахуванням пондеромоторного потенціалу:

$$n_e = n_{e0} \exp[(e\varphi - \Psi_e)/T_e]. \quad (17)$$

Як відомо [48], в стаціонарному випадку за відсутності ВЧ поля плазму можна розділити на перехідний шар і область квазинейтральності. У разі, коли глибина проникнення ВЧ поля в плазму багато більше електронного радіуса Дебая–Хюккеля $r_{De} = \sqrt{T_e/(4\pi e^2 n_e)}$, дія електронного пондеромоторного потенціалу поширюється в область квазинейтральності, де $n_e \approx n_i$. Як видно з (17), пондеромоторний потенціал Ψ_e діє на електрони як негативний електричний потенціал φ , тобто зменшує густину електронів n_e при наближенні до антени, яка в той самий час є джерелом ВЧ поля. При цьому гідродинамічна швидкість іонів в силу закону збереження імпульсу або рівняння безперервності збільшується і іони досягають швидкості іонного звуку раніше, ніж за відсутності ВЧ поля, тобто збільшується і розмір перехідного шару. Аналогічні міркування можна провести і для іонів. У перехідному шарі поблизу антени, якщо знехтувати ефектами іонізації, перезарядки та градієнта густини іонів, з рівняння руху для іонів

$$m_i v_i \frac{dv_i}{dx} = -e \frac{d\varphi}{dx} - \frac{\partial}{\partial x} \Psi_i \quad (18)$$

отримаємо вираз для енергії іонів

$$\varepsilon_i = \frac{m_i v_i^2}{2} + e\varphi + \Psi_i. \quad (19)$$

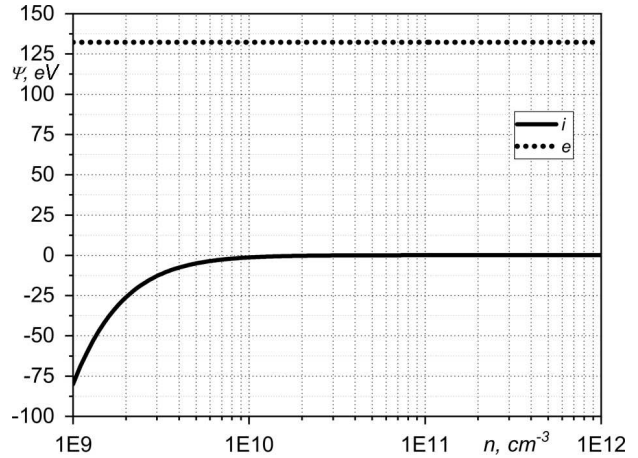


Рис. 14. Залежності пондеромоторного потенціалу, який збуджується повільною хвилею, від густини плазми для випадку $B = B_0$ і $l = 10$

Оскільки у перехідному шарі гідродинамічний потік іонів $j_i = n_i v_i \approx \text{const}$, то

$$n_i \sim (\varepsilon_i - e\varphi - \Psi_i)^{-1/2}. \quad (20)$$

З (20) випливає, що негативний іонний пондеромоторний потенціал Ψ_i буде надавати таку саму дію на іони плазми, що і негативний електричний потенціал φ , тобто зменшувати густину іонів n_i . Якщо вважати постійними значення густин електронів та іонів у формулах (17) та (20), то позитивний електронний Ψ_e та негативний іонний Ψ_i пондеромоторні потенціали зменшуватимуть абсолютне значення електричного потенціалу $|\varphi|$. При взаємодії частинок плазми, поверхні антени та ВЧ поля на антені з'являється випрямлений потенціал. Значення постійного потенціалу, що виміряні в експериментах, є сумою потенціалу ізольованого зонда та цього випрямленого потенціалу [10]. Як видно з рис. 11, відношення виміряного постійного потенціалу U_{mp} до амплітуди прикладеної ВЧ напруги $U_{\sim}$ становить $U_{mp}/U_{\sim} \sim 0,2$. У разі $U_{\sim} = 7,2 \text{ кВ}$ величина постійного виміряного потенціалу буде $U_{mp} \sim 1,5 \text{ кВ}$.

Проведені оцінки показують, що для випадку швидкої хвилі, яка збуджується поперечними до зовнішнього магнітного поля провідниками антени, спостерігається суттєве збільшення пондеромоторного потенціалу поблизу області іонного циклотронного резонансу ($B \approx B_{ci}$). У цій області внесок пондеромоторних потенціалів електронів та іо-

нів у виміряний постійний потенціал антени досягає значень $|\Psi_{e,i}/(eU_{mp})| \approx 7\text{--}15\%$ для параметрів плазми, які було задано. Поза резонансом значення пондеромоторного потенціалу малі як для електронів, так і для іонів.

У разі повільної хвилі, яка збуджується позовжніми до зовнішнього магнітного поля провідниками антени, внесок пондеромоторних потенціалів електронів та іонів у виміряний постійний потенціал антени досягає значень $|\Psi_{e,i}/(eU_{mp})| \approx 5\text{--}10\%$ для параметрів плазми, які було задано.

У цій частині роботи для масштабування результатів при розрахунках впливу пондеромоторного потенціалу використано значення змінної напруги генератора U більше, ніж в експериментальній частині.

При зменшенні амплітуди напруги, що прикладається до антени, процентний внесок пондеромоторних потенціалів буде зменшуватись, т.я. $\Psi_{e,i}U^2$, а $U_{mp}U$. Тому у разі значень напруги ВЧ генератора $U = 4,5$ кВ, які були використані в експериментальній частині роботи, внесок пондеромоторних потенціалів електронів та іонів у виміряний постійний потенціал антени буде $|\Psi_{e,i}/(eU_{mp})| \approx 5\text{--}10\%$ за тих же умов, що і для $U = 7,2$ кВ.

Розрахунок просторового та часового розподілів пондеромоторного потенціалу поблизу антени може стати предметом подальших досліджень.

5. Висновки

В результаті проведених досліджень було показано, що під час роботи ВЧ генератора Каскад при створенні плазми в торсатроні Ураган-2М, постійна напруга рамкової антени U_{mp} , виміряна в середній точці пристрою, що узгоджує вихідний опір генератора з плазмовим навантаженням в антені, протягом ВЧ імпульсу має як позитивну, так і негативну складову, що дозволяє говорити про наявність просторового заряду поблизу поверхні антени.

Було встановлено, що величина негативного потенціалу U_{mp} залежить від напруги на анодах ламп генератора ВЧ, з його зростанням U_{mp} збільшується (за абсолютною величиною). Також вона збільшується зі зростанням тиску робочого газу в камері установки.

Виміряно величину негативного потенціалу рамкової антени. Вона коливалася в межах 1–1,7 кВ.

Максимальне значення U_{mp} , яке було зафіксовано в експериментах, становило $-1,75$ кВ. Воно фіксується в момент максимальної швидкості наростання сигналу випромінювання H_β .

Розрахунки показали, що навколо поперечних до зовнішнього магнітного поля провідників антени поблизу області іонного циклотронного резонансу ($B \approx B_{ci}$) та поблизу позовжних до зовнішнього магнітного поля провідників антени внесок пондеромоторних потенціалів електронів та іонів у виміряний постійний потенціал антени досягає значень 7–15% для заданих параметрів плазми. Врахування позитивного електронного та негативного іонного пондеромоторних потенціалів призведе до зменшення густин іонів та електронів та зменшення абсолютного значення електричного потенціалу.

У подальшому планується провести аналогічні дослідження для двонапіввиткової W7-X-подібною антени в Ураган-2М.

Автори дякують Ростиславу Павліченко за надану інформацію по розташуванню магнітних поверхонь в установці Ураган-2М.

Роботу В.Б. Коровіна було частково підтримано грантом Фонду Саймонса (№ 1290591).

1. O.S. Pavlichenko for the U-2M group. First results from the 'URAGAN-2M' torsatron. *Plasma Phys. Control. Fusion* **35**, B223 (1993).
2. V.E. Bykov, A.V. Georgievskij, V.V. Demchenko, Yu.K. Kuznetsov, Yu.A. Litvinenko, A.V. Longinov, O.S. Pavlichenko, V.A. Rudakov, K.N. Stepanov, V.T. Tolok. Uragan-2M: A torsatron with an additional toroidal field. *Fusion Techn.* **17**, 140 (1990).
3. V. Moiseenko *et al.* First experiments on ICRF discharge generation by a W7-X-like antenna in the Uragan-2M stellarator. *J. Plasma Phys.* **86**, 905860517 (2020).
4. M.D. Carter, A.I. Lysojvan, V.E. Moiseenko, N.I. Nazarov, O.M. Shvets, K.N. Stepanov. Plasma production using radiofrequency fields near or below the ion cyclotron range of frequencies. *Nucl. Fusion* **30** (4), 723 (1990).
5. S.M. Levitsky. The space potential and electrode sputtering in the RF discharge. *Zh. Tekhn. Fiz.* **27** (5), 1001 (1957).
6. I.R. Myra, D.A. D'Ippolito, D.A. Russel *et al.* Nonlinear ICRF – plasma interactions. *Nucl. Fusion* **46** (7), S455 (2006).
7. C.E. Thomas *et al.* ICRF/Edge interaction guidelines for ICRF antenna design and initial ICRF/Edge interaction experiments on the tore supra Tokamak. *Fusion Tech.* **30** (1), 1 (1996).
8. D. Banerji, R. Ganguli. On deposits of metallic mercury by high-frequency discharge. *Phil. Mag.* **15**, 678 (1933).

9. D. Banerji, R. Ganguli. On the distribution of space-potential in high-frequency glow discharge. *Philosophical Magazine* **11** (69), 410 (1931).
10. V.A. Godyak, A.A. Kuzovnikov. About valve properties of RF-discharge. *Plasma Phys. Rep.* **1** (3), 496 (1975).
11. V.A. Godyak, A.N. Ivanov, A.A. Kuzovnikov. Changes of Langmuir probe floating potential by the alternating voltage. *JTP* **37** (6), 1063 (1967).
12. Ya.F. Leleko, L.I. Grigor'eva, V.V. Chechkin, D.L. Grekov. Influence of the frame-type antenna on the RF-discharge peripheral plasma parameters in the Uragan-3M torsatron. *Problems Atom. Sci. Techn., Series: Plasma Phys.* (23) **107** (1), 40 (2017).
13. S.J. Wukitch, B. LaBombard, Y. Lin, B. Lipschultz, E. Marmar, M.L. Reinke, D.G. Whyte, the Alcator C-Mod Team. ICRF specific impurity sources and plasma sheaths in Alcator C-Mod. *J. Nucl. Mater.* **390–391**, 951 (2009).
14. V.A. Godyak. A stationary low-pressure RF discharge. *Fizika Plazmy* **2** (1), 141 (1976).
15. B.A. Годяк, А.А. Кузовников. О вентильных свойствах ВЧ-разрядов. *Физика плазмы* **1** (3), 496 (1975).
16. V.L. Berezhnyj. ICRF – volume charge – antenna edge interactions in the U-3M and U-2M torsatrons. Part 3. ICRF – VSC interaction. *Probl. At. Sci. Technol. Ser. Plasma Phys.* **117** (1), 10 (2017).
17. Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко. *Высококачественный емкостной разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения* (Наука, 1995).
18. M.L. Mayoral, P.U. Lamalle, D. van Eeser *et al.* Hydrogen plasmas with ICRF inverted minority and mode conversion heating regimes in the JET tokamak. *Nucl. Fusion* **46**, 550 (2006).
19. К.В. Вавилин, М.А. Гоморев, Е.А. Кралькина, П.А. Неклюдова, В.Б. Павлов, Чень Чжао. Экспериментальное изучение параметров плазмы гибридного ВЧ-разряда низкого давления. *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия* № 1, 101 (2012).
20. E.P. Velikhov, A.S. Kovalyov, A.T. Rakhimov. *Physical Phenomena in the Gas-Discharge Plasma* (Nauka, 1987).
21. E.D. Volkov, L.I. Grigor'eva, Yu.G. Zaleskij, V.G. Konovalov, N.I. Nazarov, I.I. Patlaj, G.N. Polyakova, A.I. Skibenko, A.S. Slavnyj, V.V. Chechkin, A.N. Shapoval. On the mechanisms of light and heavy impurity release during RF plasma heating in the Uragan-3 Torsatron. *Fusion Engineering and Design* **12** (1–2), 237 (1990).
22. V.I. Bobkov, R. Bilato, F. Braun *et al.* ICRF antenna coupling dependence on edge plasma conditions in ASDEX Upgrade. *Nuclear Fusion* **46**, 469 (2006).
23. D.A. D'Ippolito, I.R. Myra, J.H. Rogers *et al.* Analysis of RF sheath interactions in TFTR. *Nuclear Fusion* **38** (10), 1543 (1998).
24. Р. Клима. О движении частиц в нерезонансных ВЧ и магнитостатических полях. *Czech. J. Phys.* **16**, 681 (1966).
25. R. Klima. The drifts and hydrodynamics of particles in a field with a high-frequency component. *Czech. J. Phys.* **18**, 1280 (1968).
26. V.E. Moiseenko, V.B. Korovin, I.K. Tarasov *et al.* The effect of an electrostatic field on runaway electrons in the Uragan-3M stellarator. *Techn. Phys. Lett.* **40** (8), 669 (2014).
27. V.B. Korovin, I.K. Tarasov, E.D. Kramskoi, D.A. Sitnikov, N.B. Dreval', A.V. Lozin, M.M. Kozulya. Suppression of runaway electron flows and specific features of working gas breakdown in the Uragan-2M Torsatron. *Techn. Phys.* **63** (7), 960 (2018).
28. V.K. Pashnev, I.K. Tarasov, D.A. Sitnikov, V.N. Bondarenko, V.V. Chechkin, A.N. Shapoval, R.O. Pavlichenko, M.I. Tarasov, E.L. Sorokovoy, A.A. Petrushenya, A.I. Skibenko, L.L. Karpuhin, A.V. Lozin. The problem of plasma density increasing in the U-3M torsatron after RF heating termination. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki.* **83** (1), 15 (2013).
29. Л.И. Григорьева, Б.И. Смердов, В.В. Чечкин. К вопросу о влиянии электростатического поля антенны на поведение периферийной плазмы при ВЧ-нагреве. Препринт ХФТИ 86-13 (ХФТИ АН УССР, 1986).
30. Л.И. Григорьева, А.В. Пашенко, Б.И. Смердов, В.В. Чечкин. Исследование процессов формирования потенциала плазмы и переноса частиц под влиянием внешнего переменного электрического поля. Препринт ХФТИ 84-8 (ЦНИИатоминформ, 1984).
31. I.M. Pankratov *et al.* Behavior of RF Discharge Plasmas in the Uragan-3M and Uragan-2M Torsatrons. *Contrib. Plasma Phys.* **50** (6–7), 520 (2010).
32. A.G. Dikiy, S.S. Kalinichenko, A.A. Kalmykov *et al.* *Plasma Phys.* **18**, 557 (1976).
33. V.E. Moiseenko, A.V. Lozin, M.M. Kozulia, Yu.K. Mironov, V.S. Romanov, V.G. Konovalov, A.N. Shapoval. Alfvén plasma heating in stellarator URAGAN-2M. *Ukr. J. Phys.* **62** (4), 311 (2017).
34. V.E. Moiseenko *et al.* RF plasma production and heating below ion-cyclotron frequencies in Uragan torsatrons. *Nuclear Fusion* **51**, 083036 (2011).
35. V.E. Moiseenko *et al.* Progress in stellarator research at IPP-Kharkov. *Nukleonika* **61**, 91 (2016).
36. V.B. Korovin, E.D. Kramskoy. Radio-frequency equipment for Uragan stellarators. *Problems of Atomic Sci. and Techn. Ser.: Plasma Phys.* **6** (82) 19 (2012).
37. M.S. Neiman. *Kurs radioperechodov ustroystv* (Sovetskoe radio, 1957).
38. V.B. Korovin, I.K. Tarasov, A.V. Lozin, M.M. Kozulia, E.L. Sorokovoy, E.D. Kramskoy, V.Yu. Gribanov, D.I. Baron, S.A. Tsybenko. Behavior features of the ungrounded antenna potential shift in URAGAN-2M torsatron. *Probl. At. Sci. Techn. Ser.: Plasma Phys.* **1**, 9 (2023).
39. A.I. Lysojvan, V.E. Moiseenko, O.M. Schvets, K.N. Stepanov. Analysis of ICRE ($\omega \leq \omega_{ci}$) plasma production in large scale tokamaks. *Nucl. Fusion* **32** (8), 1361 (1992).
40. V.E. Moiseenko, Yu.S. Stadnik, A.I. Lysoivan, V.B. Korovin. Self-Consistent modeling of radio-frequency plasma generation in stellarators. *Plasma Phys. Rep.* **39** (11), 873 (2013).

41. V.E. Moiseenko, Yu.S. Stadnik, O.M. Shvets *et al.* *RF Plasma Production in Uragan-2M Torsatron. 17th Topical Conf. on Radio-Frequency Power in Plasma, Clearwater, Florida, USA, 2007* [ISBN: 9780735404441].
42. Ya.F. Leleko, L.I. Grigor'eva, V.V. Chechkin, D.L. Grekov. Influence of the frame-type antenna on the rf-discharge peripheral plasma parameters in the URAGAN-3M torsatron. *Problems of Atomic Sci. and Techn. Series: Plasma Phys.* **107**, 40 (2017).
43. V.B. Korovin, V.V. Filippov, M.M. Kozulya *et al.* Effect of plasma on the radio-technical characteristics of the Uragan-2M torsatron matching RF systems. *Problems of Atomic Sci. and Techn. Series: Plasma Phys.* **94**, 41 (2014).
44. A.V. Lozin, Yu.V. Kovtun, V.E. Moiseenko, S.M. Maznichenko, M.M. Kozulia, V.B. Korovin, A.N. Shapoval, E.D. Kramskoy, R.O. Pavlichenko, N.V. Zamanov, M.M. Makhov, A.Yu. Krasyuk, Y.V. Siusko, A.I. Tymoshenko, V.M. Listopad, T. Wauters, Ye. Kazakov, J. Ongena. Two-strap RF antenna in Uragan-2M stellarator. *Probl. At. Sci. Technol. Ser.: Plasma Phys.* **130**, 10 (2020).
45. N.T. Besedin, S.V. Kasilov, I.M. Pankratov, A.I. Pyatak, K.N. Stepanov. *VIII IAEA Stellarator Workshop, Kharkov Vienna: IAEA, 1991.*
46. R. Klima. Drift approximation for a field with a non-resonant high-frequency component. *JETP* **26** (3), 535 (1968).
47. А.И. Ахиезер, И.А. Ахиезер, Р.В. Половин, А.Г. Ситенко, К.Н. Степанов. *Электродинамика плазмы* (Наука, 1974).
48. Ya.F. Leleko, D.L. Grekov. Influence of ion viscosity on the distributions of plasma parameters in stationary gas discharge. *Ukr. J. Phys.* **66** (4), 316 (2021).

Одержано 19.09.24

V.B. Korovin, I.K. Tarasov, Ya.F. Leleko,
E.L. Sorokovyi, Yu. V. Kovtun, O.M. Shapoval,
M.M. Kozulya, O.A. Lozin, A.M. Tarasov,
E.D. Krams'kyi, V.V. Filippov, O.V. Yevsyukov

DYNAMICS OF THE UNGROUNDED ANTENNA POTENTIAL IN AN URAGAN-2M TORSATRON DURING AN RF PULSE

It has been shown that the loop radiofrequency (RF) antenna, which is used to create initial plasma in the Uragan-2M stellarator and is electrically not connected to the installation housing, acquires both negative and positive potentials during the RF pulse. The influence of the RF generator supply voltage and the working gas pressure on the antenna potential is studied. The change in the antenna potential during the simultaneous operation of two RF generators is shown. The influence of the ponderomotive forces on the loop antenna potential is estimated theoretically.

Keywords: stellarator, torsatron, high-frequency heating, escaping electrons.