

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

КОРОВІН ВАЛЕРІЙ БОРИСОВИЧ

УДК 533.9

**ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ
ПОЛІВ У СТЕЛАРАТОРАХ УРАГАН**

01.04.08-фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико–технічний інститут» НАН України.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
МОІСЕСНКО Володимир Євгенович,
Національний науковий центр
«Харківський фізико – технічний інститут»
НАН України, завідувач відділу стелараторів.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
ЛІСОВСЬКИЙ Валерій Олександрович,
Харківський національний університет імені
В.Н. Каразіна, професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій;

кандидат фізико-математичних наук,
ФЕДУН Віктор Іванович,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний
університет» МОН України, м. Маріуполь,
доцент кафедри фізики.

Захист відбудеться «15» січня 2021 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України за адресою: 61108, м. Харків, пр. Академіка Курчатова, 31, ауд. 313.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи 4.

Автореферат розіслано «4» грудня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12



Андрій ГАХ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Високочастотні (ВЧ) методи створення і нагрівання плазми відомі давно. Ще в п'ятдесяті роки минулого століття з'ясувалося, що для отримання температур, необхідних для термоядерного синтезу, окрім омичного нагрівання, необхідно шукати додаткові способи нагрівання плазми. ВЧ розряди також застосовують для проведення очищення стінок вакуумної камери. На установці Ураган-3 в 1987 р. в ХФТІ під керівництвом Назарова М.Г. був розроблений і вперше в світі застосований метод ВЧ очищення вакуумних камер термоядерних установок. На сьогодні ВЧ методи нагрівання широко використовують на сучасних установках. У стелараторах Ураган-2М і Ураган-3М (м. Харків) традиційно застосовують ВЧ метод створення і нагрівання плазми на частоті іонно-циклотронного резонансу (ІЦР). Метод ІЦР також застосовують як додатковий спосіб нагрівання плазми на багатьох установках, наприклад: стеларатори-надпровідний-LHD (Японія), в Німеччині-новітній Wendelstein-7X, токамаки: JET у Великобританії, ASDEX-U у Німеччині, і планують, звичайно, на найбільшому в світі міжнародному токамаку ITER, що будується. Тому ретельне вивчення взаємодії ВЧ випромінювання з плазмою, розробка та експериментальне дослідження роботи ВЧ обладнання, проблеми пригнічення потоків електронів-утікачів (ЕУ) є невід'ємною частиною всіх міжнародних програм, направлених на досягнення керованого термоядерного синтезу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в ІФП ННЦ ХФТІ відповідно до планів науково-дослідних робіт і програм у межах наступних тем:

ІІІ-3-11 (ІФП). (2016-2020) № держреєстрації 0116U006160, П-3/22 (2017-2019) № держреєстрації 0117U005084, ІІІ-3-11 (2011-2015) № держреєстрації № 0111U009608, Х-5-5 (2011-2012) № держреєстрації 0111U009604, П-3/22 (2014-2015) № держреєстрації 0114U001808, Х-5-3 (2013-2015) № держреєстрації 0113U006380, ІІІ-3-16 (ІФП) (2016-2020) № держреєстрації 0116U006160;

Україна-Словенія, М/294-2013, М/124-2014- Проекти Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) №4216 (2007-2010); №6057 (2015-2016).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є вивчення важливих аспектів взаємодії ВЧ електромагнітних полів з плазмою в тороїдальних установках Ураган, а, саме: встановлення механізму і знаходження закономірностей впливу величини магнітного поля і тиску робочого газу на внесений плазмою електричний опір навантаження антенного коливального контуру, впливу плазми на частотний спектр ВЧ полів, які генеруються ВЧ джерелами, дослідження процесів пригнічення потоку електронів-утікачів, а також впливу ВЧ розрядів різних режимів на процеси очищення стінок вакуумної камери.

Для досягнення поставленої в дисертаційній роботі мети сформульовані і вирішені наступні завдання:

1. Дослідити процеси взаємодії плазми з рамковою антеною в умовах очищення стінок вакуумної камери ВЧ розрядами. Дослідити вплив плазми на навантаження рамкової антени.

2. Дослідити зміни ВЧ спектру струму в рамковій антені в режимі очищення стінок вакуумної камери, та на основі аналізу вдосконалити роботу комплексу ВЧ обладнання для створення і нагрівання плазми в стелараторах Ураган.
3. Дослідити вплив попередньої плазми, створеної ВЧ полями в стелараторах Ураган на стабільність розвитку основного розряду.
4. Вивчити динаміку очищення стінок вакуумної камери безперервним розрядом, який створюється ультракороткими хвилями на частотах вище ІЦР, та на підставі аналізу результатів досліджень розробити методику і обладнання для очищення.
5. Дослідити процеси пригнічення потоку електронів-утікачів, які виникають в моменти підйому та спаду імпульсів магнітного поля, розробленим методом з використанням рамкової антени а також вивчити супутній цим процесам вплив на параметри плазми.

Об'єкт досліджень: процес ВЧ очищення, створення та нагрівання плазми ВЧ електромагнітними полями, а також утворення потоків ЕУ в установках з тороїдальною магнітною системою та імпульсним магнітним полем.

Предмет досліджень: фізичні характеристики взаємодії плазми з джерелами електромагнітних полів, а також результати впливу постійного потенціалу на потоки заряджених частинок.

Методи дослідження. Для вивчення процесів взаємодії плазми і ВЧ устаткування, а також керування потоками ЕУ використані комплексні вимірювання, які поєднують добре відомі та широко апробовані методи досліджень фізики плазми, а саме: тиск газу вимірювався за допомогою іонізаційно-термопарного вакуумметра ВІТ-3, оснащеного широким набором іонізаційних і термопарних перетворювачів. Парціальний тиск газів вимірювався за допомогою приладів ВПТО 1(2). Рівень сигналу електронного синхротронного випромінювання визначався (якісно) за інтенсивністю випромінювання на другій гармоніці частоти електронно-циклотронного резонансу з центральної області плазмового шнура. Густина плазми та температура електронів у горизонтальній площині вимірювалась ленгмюрівським зондом. ВЧ потужність, напруга і струм в антені вимірювалися за допомогою спеціально розроблених ВЧ подільників напруги та датчиків струму, а також направлених відгалужувачів. Поява потоку ЕУ визначалася з наявності жорсткого рентгенівського випромінювання, яке фіксувалося за допомогою сцинтилятора фотоелектронного помножувача ФЕП 9, підключеного згідно зі стандартною методикою. Використання такого набору діагностик дало можливість отримати всю необхідну інформацію про процес ВЧ плазмового очищення вакуумної камери стеларатора та про механізм пригнічення потоку ЕУ на фронті та спаді магнітного поля постійним потенціалом.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше на стелараторі Ураган-2М експериментально вивчено взаємодію плазми з ВЧ системою, що генерує електромагнітні поля, які створюють саму плазму. Визначено вплив плазми на добротність коливального контуру антени. На підставі цих експериментів розроблено методику очищення вакуумної камери і оптимізовані режими ВЧ очищення.

2. Вперше проведено дослідження спектру ВЧ струму в рамковій антені, в режимі очищення стінок вакуумної камери. Виявлено вищі гармоніки основної частоти і розроблено метод і пристрій для пригнічення цих гармонік.

3. Вперше запропоновано на стелараторі Ураган 3М проводити попередню іонізацію ВЧ випромінюванням. Встановлено, що така передіонізація вирішує проблему повторюваності параметрів основного розряду. На підставі експериментів розроблено обладнання для здійснення попередньої іонізації.

4. Вперше експериментально досліджено очищення камери безперервними розрядами з частотою вище ІЦР, та в разі суперпозиції полів цих розрядів з імпульсними розрядами від ВЧ джерел Каскад. Показана придатність таких розрядів для очищення камери і доцільність застосування їх для установок з надпровідними котушками магнітного поля. Розроблено оперативний спосіб визначення динаміки очищення вакуумної камери із застосуванням криогенної пастки.

5. Вперше в стелараторах Ураган досліджено вплив квазістаціонарного електричного поля на формування потоку ЕУ. Показана можливість придушення потоку ЕУ завдяки подачі постійного потенціалу на ВЧ антену, за допомогою якої створюється плазма. Експериментально вивчено вплив квазістаціонарного потенційного поля на параметри створюваної плазми.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані в дисертаційній роботі результати роблять внесок у розвиток фізики високочастотної плазми, методів ВЧ створення та нагрівання плазми в замкнутій магнітній пастці, методів ВЧ очищення та захисту стінок вакуумної камери термоядерних установок від впливу пучків ЕУ. Викладені в роботі результати можуть знаходити застосування і в роботах прикладного характеру для сучасних плазмових технологій.

При дослідженні впливу плазми, як навантаження, на ВЧ тракт генераторів в режимі нагрівання плазми визначено оптимальні параметри магнітного поля та робочого тиску для забезпечення введення в антену максимальної ВЧ потужності.

Пригнічення вищих гармонік основної частоти генератора, виявлених при вивченні струму в антені, сприяло підвищенню точності всіх ВЧ вимірювань на стелараторах Ураган. Удосконалені ВЧ джерела Каскад використовують на стелараторах Ураган для створення, нагрівання плазми та проведення очищення вакуумної камери.

Створення режиму попередньої іонізації при застосуванні джерела Каскад 0 в установці Ураган 3М дало можливість підвищити повторюваність результатів експериментів при дослідженнях стартової фази ВЧ пробою.

Внаслідок дослідження очищення вакуумної камери стеларатора Ураган 2М на частоті вище частоти іонно-циклотронного резонансу УКХ розрядом, цей метод постійно використовується при підготовці стелараторів до проведення експериментів. Перевага цього методу очищення полягає в тому, що його можна реалізувати в магнітному полі, що є важливим для установок з надпровідними магнітами, в яких вмикання / вимикання магнітного поля є набагато складнішим процесом, ніж у звичайних стелараторах. Скорочення часу очищення вакуумної камери стеларатора досягнуто при одночасній роботі ВЧ джерел Каскад та УКХ генератора.

Використання розробленого способу оцінки динаміки очищення вакуумної камери за допомогою кріогенної пастки дало можливість скоротити витрати часу при здійсненні ВЧ очищення на стелараторі Ураган-2М. Спосіб дає можливість здійснити економію електроенергії, ресурсу роботи всієї термоядерної установки.

Запропонований спосіб пригнічення потоків ЕУ не вимагає введення додаткових пристроїв у вакуумний простір установки. Це має значення для великих установок, де потоки ЕУ можуть бути значними, а розміщення додаткового устаткування всередині вакуумної камери ускладнено.

Публікації. Результати роботи повністю відображено у 21 науковій праці, у тому числі в 8 статтях у фахових журналах [1-7, 21], двох авторських свідоцтвах [19, 20] та 11 матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях [8-18].

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовані автором особисто. Автору належить: постановка і обґрунтування мети, планування і проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів, підготовка матеріалів до публікації, участь в апробуванні результатів роботи. Постановка задач та обговорення результатів досліджень виконано спільно з науковим керівником та співавторами статей.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що увійшли до дисертаційної роботи, доповідалися на наступних конференціях:

International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoin Workshop «Nano-andmicro-sizedstructuresinplasmas» (Alushta, 2012); Seventh IAEA Technical Meeting on «Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices» (France, 2013); Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Київ, 2013); International Conference on Research and Applications of Plasmas «PLASMA-2013» (Warsaw, 2013); International Conference - School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoin Workshop «Nano-and micro-sized structures in plasmas» (Kharkiv, 2014); Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Київ, 2015); International Conference - School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, 2016, 2018)

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 156 сторінок, з яких основний текст - 118 сторінок. Робота містить 57 рисунків та 1 таблицю. Список використаних літературних джерел налічує 153 найменування на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, вказано мету і завдання роботи, наведено зв'язок дисертаційної роботи з науковою тематикою досліджень, які проводять в ІФП ННЦ ХФТІ, та особистий внесок здобувача. Наведені дані про наукову новизну отриманих результатів та їх практичну значущість, апробацію роботи та про публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано існуючі ВЧ системи, які застосовують на сучасних термоядерних установках як для очищення вакуумної камери, так і для нагрівання плазми. Наведено приклади побудови як складних багатокаскадних ВЧ

генераторів з вихідною потужністю в десятки МВт (JET, ITER), так і однокаскадних (КТМ), які використовують в якості джерела для додаткового нагрівання. Проаналізовано існуючі методи пригнічення потоків ЕУ на різних установках.

У **другому розділі** розглянуто механізм взаємодії плазми і ВЧ обладнання, впливу плазми на параметри антенного контуру. Представлені ВЧ джерела електромагнітних полів, які були вдосконалені та використані як для створення і нагрівання плазми, так і для очищення вакуумної камери ВЧ електромагнітними полями в стелараторах Ураган. Наведено схеми і конструкція ВЧ джерел Каскад (рис. 1).

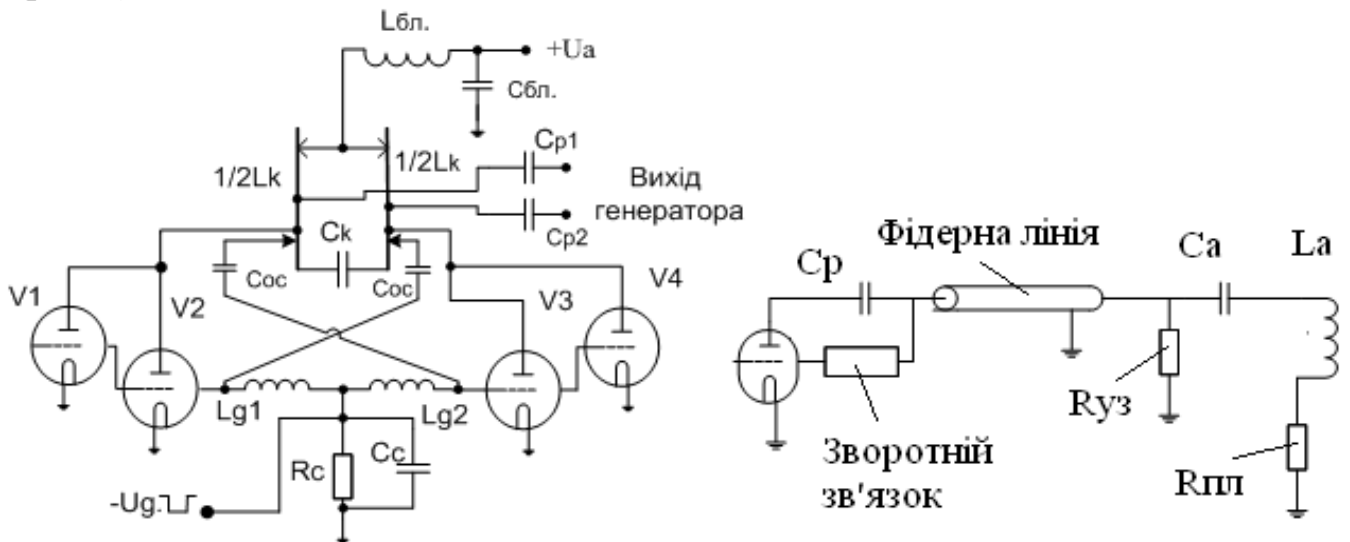


Рис. 1 Принципова схема ВЧ частини генератора Каскад-ліворуч, схема ВЧ генератора зі складною коливальною системою-праворуч

Це є імпульсні однокаскадні двотактні автогенератори, які мають по дві лампи в кожному плечі і працюють у частотному діапазоні 3-10 МГц. В якості індуктивності анодного контуру генератора використовують короткозамкнений відрізок дводротової лінії. Розроблено також схему, що використовує складну коливальну систему, утворену фідерною лінією передачі та контуром антени (рис. 1 праворуч). Розглянуто вплив плазми на радіотехнічні характеристики ВЧ системи на стелараторі Ураган 2М. Проведено аналіз узгодження ВЧ генератора з плазмою, запропонована еквівалентна схема живлення антени L_a з послідовним опором r_a , внесеним плазмою в антену (рис. 2). Паралельно ланцюгу антени - навантаження (внесений опір) увімкнуто конденсатор C_a . Ці три елементи утворюють паралельний коливальний контур, який настраюється на частоту коливань ВЧ генератора, тобто на частоту нагрівання. В умовах резонансу $f = 1 / \sqrt{L_a C_a}$ еквівалентний опір контуру стає чисто активним $R_k = L_a / r_a \cdot C_a$. Узгоджувальний трансформатор із коефіцієнтом трансформації $k_{тр}$ перетворює цей опір антенного контуру R_k до величини опору на вході трансформатора $R_{вх} = R_k / k_{тр}^2$, який має дорівнювати хвильовому опору лінії передачі ВЧ енергії від генератора до антени ρ_f . Отримуємо співвідношення $R_k = \rho_f \cdot k_{тр}^2$.

Для установок Ураган хвильовий опір фідерної лінії передачі складає 25 Ом для одного плеча. Тоді значення опору, що вноситься, необхідного для повного узгодження, складає $R_k = 50 \cdot k_{тр}^2$. При дотриманні цієї умови виконується узгодження ВЧ тракту від генератора до навантаження - плазми.

Зроблено оцінку ступеня взаємодії антени з плазмою, наведено методику визначення добротності антенного контуру, яка полягає в наступному. При резонансі опір паралельного коливального контуру має активний характер. Струм у контурі дорівнює $I_k = U_k / \rho$, а струм, що підводиться до контуру (струм живлення, тобто, основна гармоніка анодного струму лампи генератора) $I_f = U_k / (\rho \cdot Q)$. Звідси

отримуємо співвідношення: $Q = I_k / I_f$. Представлений графік залежності частки $I_k / I_f = Q$ від магнітного поля показує діапазон до 0,05 Тл, в якому добротність є малою, та діапазон вище 0,055 Тл, у якому видно збільшення добротності (рис. 3).

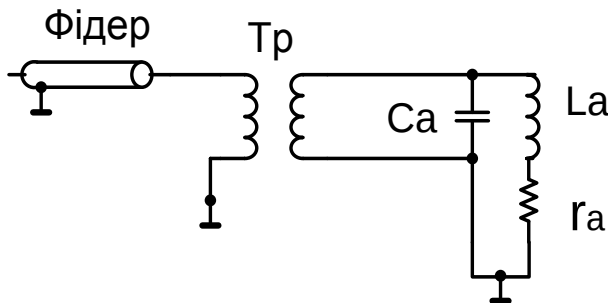


Рис. 2. Електрична схема узгодження антени і фідера

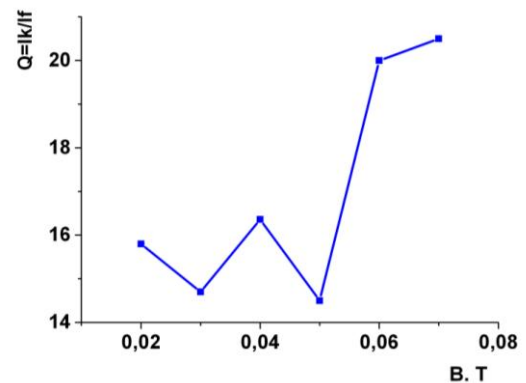


Рис. 3. Залежність $Q = I_k / I_f$ від величини магнітного поля

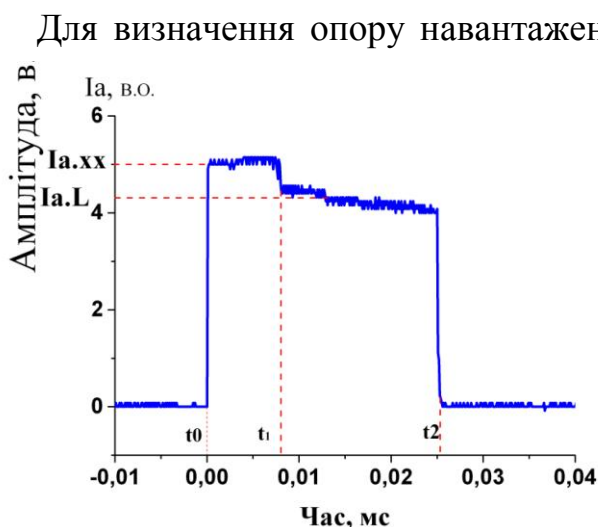


Рис. 4. Залежність струму в антені від часу-при створенні плазми.

Для визначення опору навантаження ВЧ контуру в режимі створення плазми виміряно ВЧ струм у контурі антени в момент часу t_0 - t_1 , поки розряд відсутній- I_{axx} (так званий режим холостого ходу) (рис. 4). І цей самий струм в антені I_{aL} , але вже в режимі завантаження антени плазмою (t_1 - t_2).

У режимі холостого ходу опір втрат у контурі визначається, здебільшого, опором антени (активним), при створенні плазми до нього додається опір навантаження антени r_L . Оскільки струм в антені в режимі холостого ходу дорівнює $I_{axx} = U_k / (\rho + r_{ant})$, а при навантаженні- $I_{aL} = U_k / (\rho + r_{ant} + r_L)$, то

відношення цих струмів визначається виразом $\frac{I_{axx}}{I_{aL}} = \frac{r_L}{r_L + r_{ant}} = 1 + \frac{r_L}{\rho + r_{ant}}$, який дає можливість судити про зміну величини опору навантаження антени та величини ВЧ потужності, що випромінює антена.

За допомогою цієї методики отримані залежності співвідношення $I_{a,xx}/I_{a,L}$ від магнітного поля та тиску робочого газу (рис. 5). Виявлено ділянку в діапазоні магнітних полів від 0,025 до 0,055 Тл, де опір антенного контуру, практично не змінюється. Встановлено, що збільшення навантаження антени відбувається при величинах поля менше 0,02 Тл, а також при зростанні магнітного поля, починаючи з величини 0,055 Тл. При цьому був досягнутий максимум при $B=0,07$ Тл.

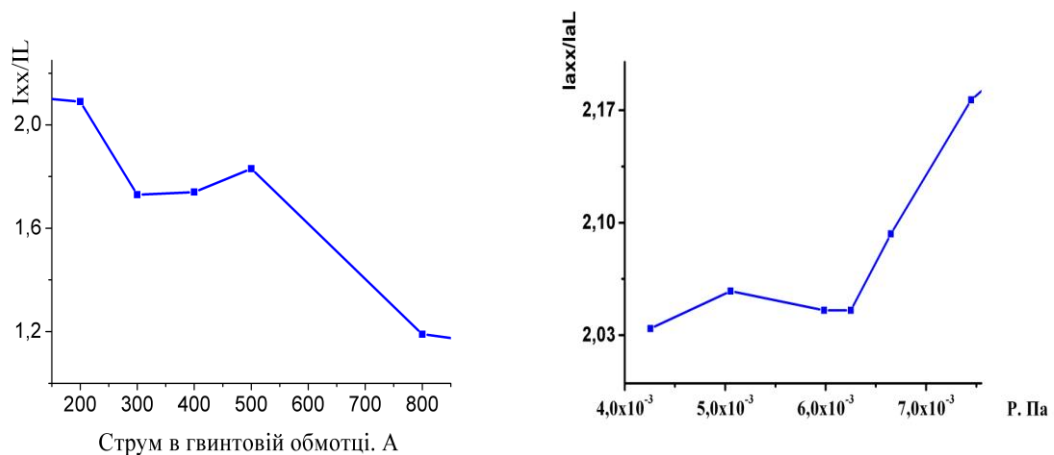


Рис. 5. Залежність $I_{a,xx}/I_{a,L}$ від гвинтового поля при початковому значенні $B_{top}=0,05$ Тл (ліворуч), і від тиску робочого газу(праворуч), при $B_{top}=0,07$ Тл.

Виявлено діапазон тиску робочого газу $4,25 \cdot 10^{-3} - 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па, в якому добротність антенного контуру Q_a мало змінюється і має мінімальні значення. Дослідження впливу гвинтового магнітного поля на добротність антенного контуру дозволило встановити, що з його підвищенням навантаження антенного контуру зменшується, що свідчить про зниження ВЧ потужності, яка вводиться до плазми.

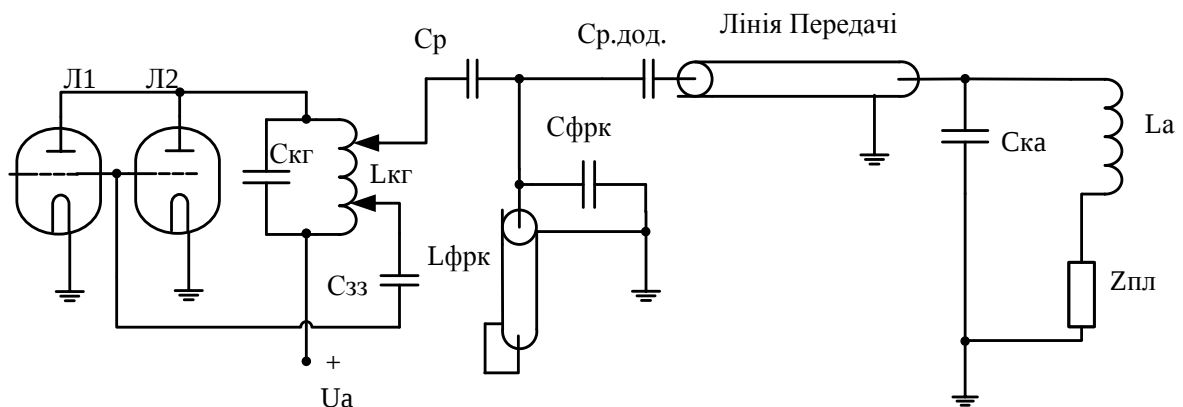


Рис. 6. Схема включення фільтрувального резонансного контуру

Виявлені вищі гармоніки у лінії передачі ВЧ потужності до антени на стелараторах Ураган. Для їх пригнічення розроблений фільтрувальний резонансний

контур (ФРК) (рис. 6). Він утворений індуктивністю $L_{\text{фрк}}$ і ємністю $C_{\text{фрк}}$. Застосування ФРК дало можливість усунути гармоніки вище за другу, а амплітуда другої гармоніки послаблялася на 5-8 дБ у різних експериментах.

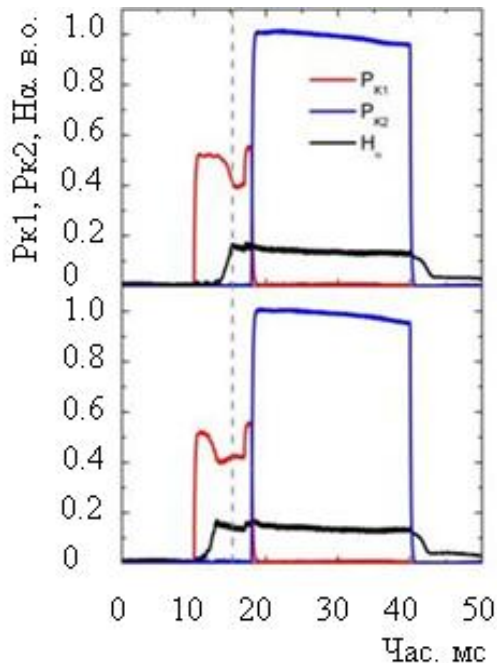


Рис. 7 Залежність за часом поведінки лінії H_α і потужності ВЧ генераторів Каскад під час дії ВЧ імпульсу: без (вгорі) і з застосуванням малої рамкової антени (внизу)

конференціях [8,11,12,15].

У третьому розділі представлено результати дослідження ВЧ оочищення вакуумної камери Ураган-2М розрядами на частоті вище за частоту іонно-циклотронного резонансу, розроблене УКХ джерело (частота 130 МГц, потужність—до 2 кВт),

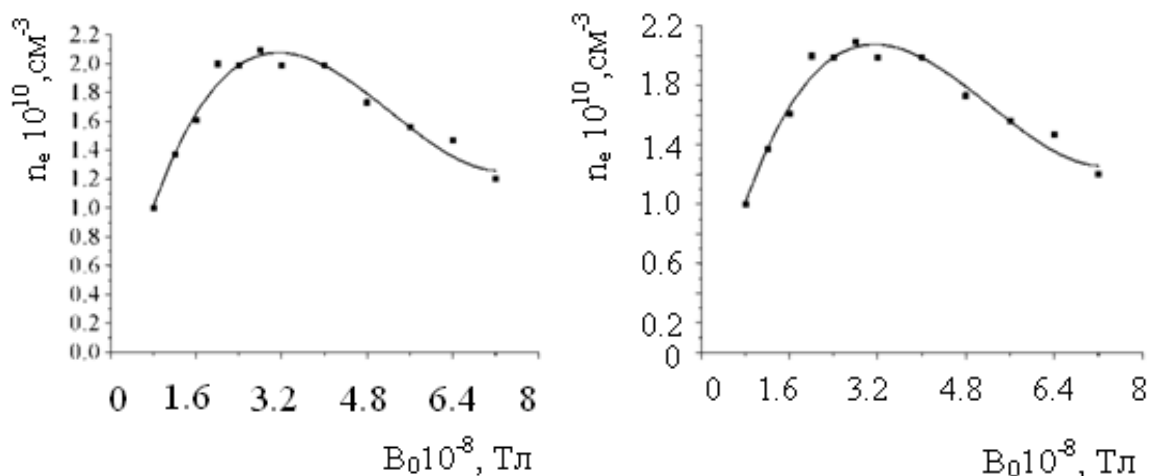


Рис. 8 Залежність густини і температури електронів в УКХ розряді від напруженості магнітного поля

Наведено результати використання режиму створення попередньої іонізації, який забезпечує підвищення повторюваності результатів експериментів. Розроблене ВЧ джерело Каскад-0, яке працює в діапазоні частот 6-8 МГц. Вихідна потужність складає близько 2 кВт. Для створення попередньої плазми була задіяна мала рамкова антена ($l = 14$ см), яка ефективно працює за умови загасання Ландау $\omega = k \cdot v_{Te}$, де k —паралельне (по відношенню до утримуючого магнітного поля) хвильове число, що генерується антеною, v_{Te} —теплова швидкість електронів. Стабілізуючий ефект ВЧ розряду на стелараторі Ураган-3М показано на рис. 7. З рисунка видно, що при використанні режиму попередньої іонізації час пробою (за світлом лінії H_α) зменшується з 6-8 мс до 3-х мс. І цей час є практично незмінним від імпульсу до імпульсу.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [1,3.а,19] та доповідались на

навантажене на малу рамкову антену, за допомогою методики з використанням кріогенної пастки. Антена націлена на збудження повільної хвилі, яка затухає за допомогою електронних зіткнень з нейтральним газом. Параметри розряду вимірюються в широкому діапазоні утримуючого магнітного поля і тиску. Були оброблені ВАХ, отримані при фіксованому положенні зонда $r=8$ см в діапазоні напруженостей магнітного поля B_0 $(1,6 - 8) \cdot 10^{-8}$ Тл. З рисунку 8 наочно впливає, що густина і температура електронів зменшуються з ростом магнітного поля, маючи максимальні значення при $B_0 = 3,2 \cdot 10^{-8}$ Тл ($T_e \sim 8$ эВ и $n_e \sim 2 \times 10^{10}$ см $^{-3}$).

Оцінка динаміки очищення вакуумної камери стеларатора Ураган-2М здійснювалася за розробленою методикою. Вона полягає в тому, що в патрубку вакуумної системи, який приєднаний до одного з вакуумних насосів, розміщують кріогенну пастку, на поверхню якої конденсується відкачуваний з камери газ, що утворюється там в процесі очищення (Рис. 9). Час конденсації є незмінним, потім пастка відсікається вакуумними клапанами з двох сторін і відігривається у цьому фіксованому об'ємі. Величина тиску P_g , отриманого після утеплення пастки є пропорційною кількості відкачаного газу з камери.

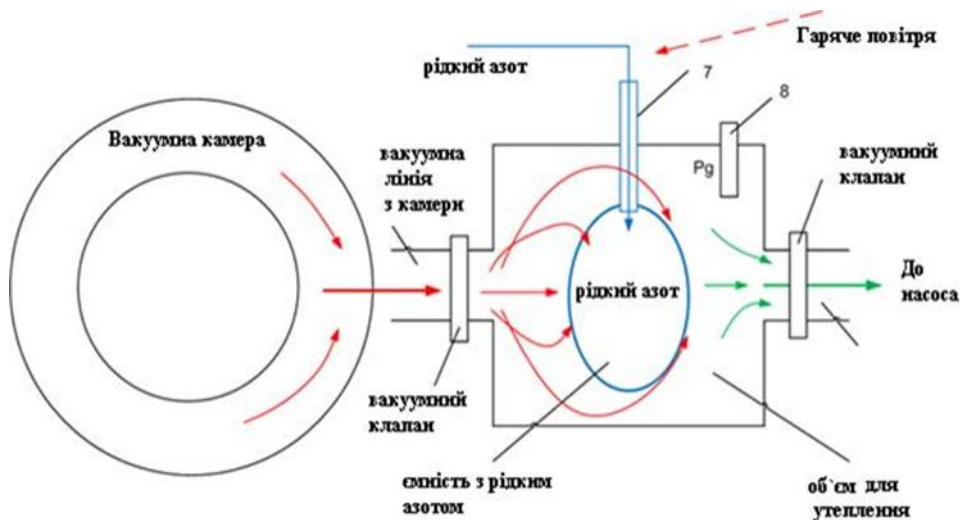


Рис. 9. Схематичне зображення принципу роботи вимірювальної пастки

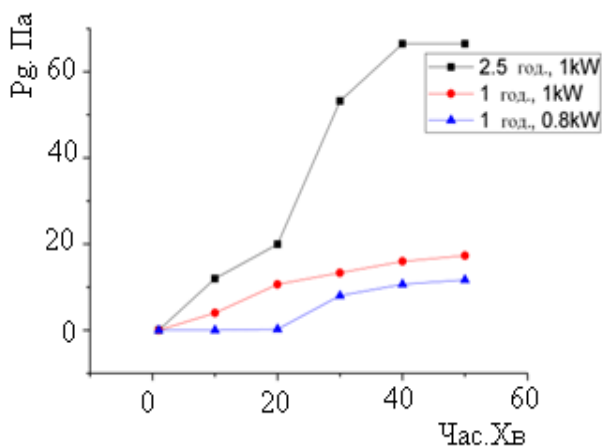


Рис. 10. Залежність тиску P_g газу в замкнутому об'ємі пастки після її утеплення

Наведені результати вимірювань тиску P_g в стелараторі Ураган-2М. На рисунку 10, видно, що чим вище потужність генератора при однаковому часі конденсації – тим більше величина тиску газу P_g , після відігривання пастки. Також видно збільшення величини P_g при збільшенні часу конденсації.

Наведено результати дослідження очищення УКХ розрядом в атмосфері гелію. За 10 днів очищення величина тиску P_g зменшилася в 2,5 рази.

Показано, що ефективність очищення в атмосфері гелію (значення P_g) при комбінованому УКХ-ВЧ розряді в 2-2,5 рази вище, ніж у разі використання тільки імпульсного ВЧ розряду.

Були проведені експерименти на Урагані-2М з дослідження УКХ очищення стінок вакуумної камери без магнітного поля. Такий режим, здається, є також корисний для термоядерних установок у певних конкретних випадках. Складно вмикати та вимикати кріогенні магнітні системи великих реакторів. З цієї причини є необхідність мати технології очищення стінок як з магнітним полем, так і без нього. ВЧ розряд може підтримуватися відносно високим тиском нейтрального газу. В якості робочих газів використовувались водневі, азотні та воднево-азотні суміші.

Вимірювали спектр оптичної емісії для кожного плазмового розряду (Рис. 11 та 12). Густина плазми та температура електронів у горизонтальній площині вимірювалась ленгмюровим зондом у перерізі антени.

Температура електронів, оцінювалася за допомогою ліній серії Фулхера і становить приблизно 2÷3 еВ, що відповідає результатам зондових вимірів. З метою визначення середніх (рівноважних) локальних параметрів плазми (густина електронів, електронна температура та плаваючий потенціал), іонну гілку струму вольтамперної характеристики (I-V) було перераховано за формулою, де V-напруга

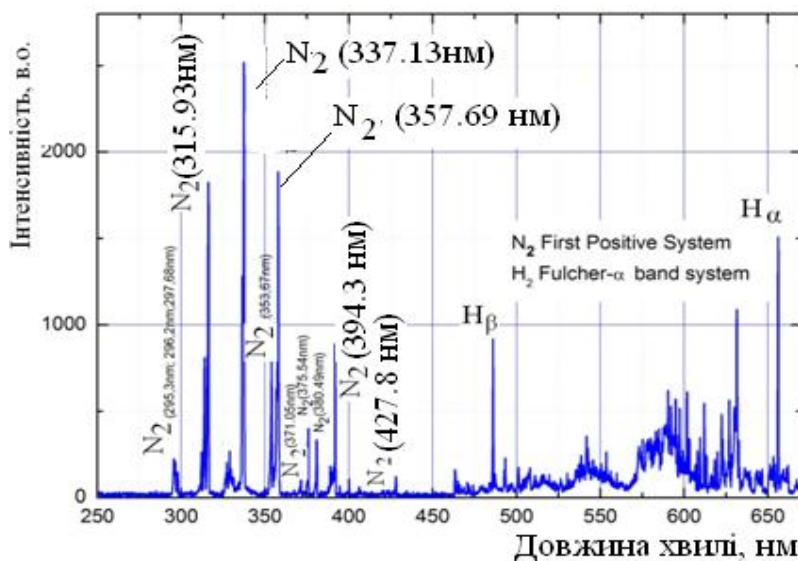


Рис. 12 . Спектр плазмового розряду суміші H_2 і N_2 із об'ємним співвідношенням газів (50%/50%).

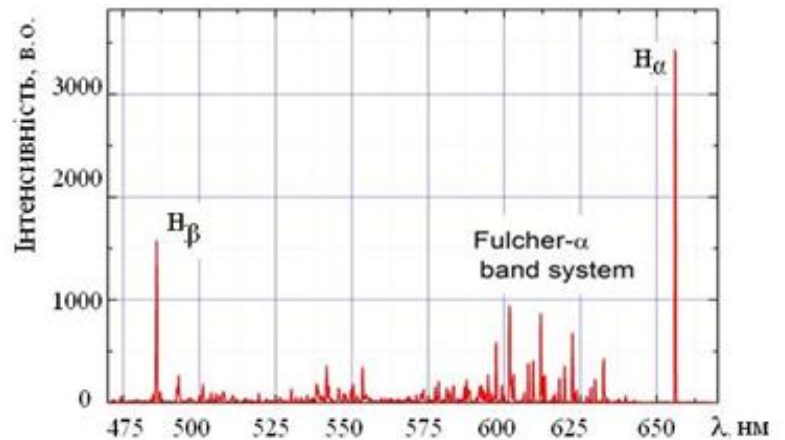


Рис. 11 . Спектр емісії плазмового розряду водню.

зміщення зонда. Вираз для струму іонного насичення $I_s \approx 0,5S_{pr} \cdot en_e \sqrt{2T_e/m_i}$, за умови, що $T_e \approx T_i \cdot m_e/m_i$, де S_{pr} —площа збираючої поверхні зонда, m_i — маса іонів плазми. Була проведена оцінка густини плазми за допомогою заміщення різних іонних мас в формулі для I_s . Маса іонів плазми передбачалась рівній 1 а.о.м. (H^+), 2 а.о.м. для (H_2^+), 14 -для (N^+), і 28-для (N_2^+). Таким чином, був визначений оптимальний для ВЧ очищення стінок робочий газ-вміст воднево-азотної суміші з

співвідношенням об'єму 50/50%, це забезпечує такі параметри плазми: температура електронів 2...4 еВ і плазмова густина $\sim 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Такі параметри були найбільш підходящі для обраного сценарію очищення стінок вакуумної камери. Для оцінки динаміки очищення використовувався описаний вище спосіб із застосуванням криогенної вакуумної пастки.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [2,4,20,21] та доповідались на конференціях [9,10,13,16].

У **четвертому розділі** викладено теоретичне обґрунтування та результати експериментального дослідження розробленого способу пригнічення потоків електронів-утікачів (ЕУ) шляхом накладення постійного потенціалу на електрод – ВЧ антену. Схему експерименту на стелараторі Ураган-3М представлено на рис. 13. Використовувалася антена рамкового типу не з'єднана з корпусом вакуумної камери установки.

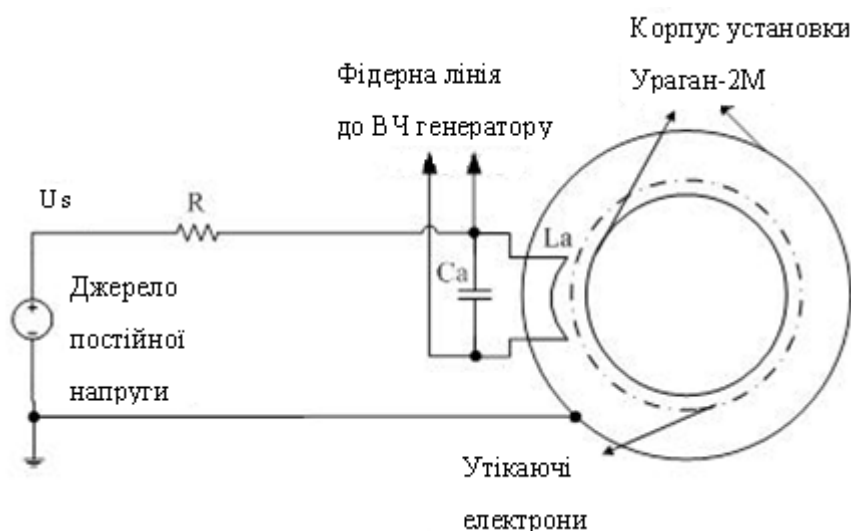


Рис. 13. Схема експерименту з пригнічення ЕУ постійним потенціалом

Паралельно антені приєднані фідерна лінія і конденсатор C_a (C_a і L_a є елементами антенного ВЧ контуру). Величина напруги U_g змінювалася як за амплітудою (від 0 до 100 В), так і за знаком (- або +). При подаванні на антену-електрод негативної напруги $U_s = -100 \text{ В}$, контрольовані випромінювання не виявлені ані на фронті, ані на спаді імпульсу магнітного поля. Це пояснюється дією постійного електричного поля в місці розташування електроду на пролітаючі електрони. Вони утримуються цим полем і не відхиляються на стінку установки. Поведінку ЕУ в стелараторі Ураган-3М діагностували також по синхротронному випромінюванню (на частоті 60 ГГц), струму електронів (вимірюваному за допомогою пояса Роговського) і жорсткому рентгенівському випромінюванню.

Представлені результати дослідження впливу ЕУ на параметри плазми в стелараторі Ураган-2М. Для цього на працюючу антену рамкового типу, за допомогою якої здійснювався ВЧ пробій, подавалася також і керуюча напруга U_s .

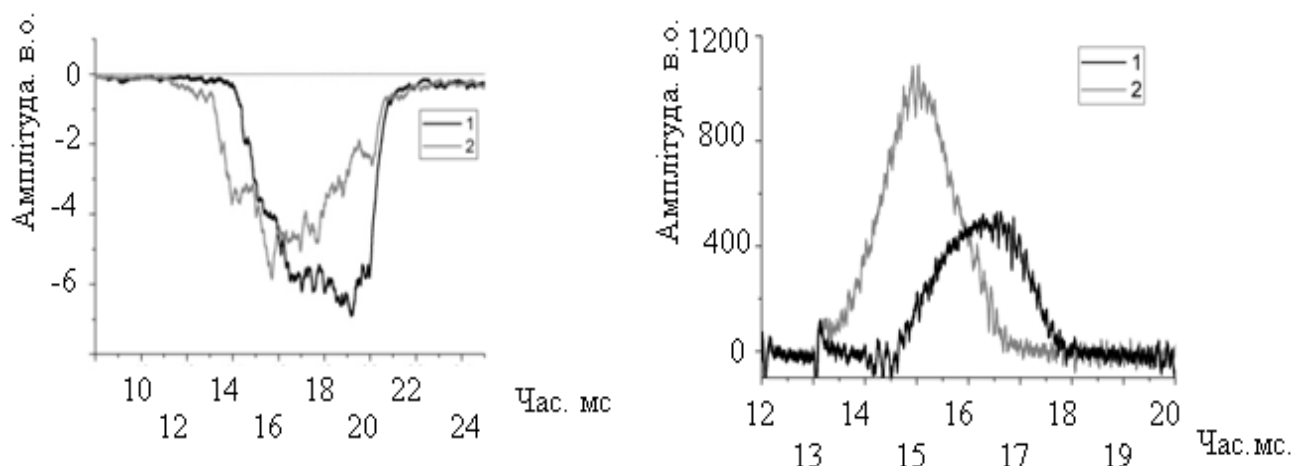


Рис. 14 Ліворуч - інтенсивність випромінювання спектральної лінії водню H_{α} (6562,85 Å). Праворуч - інтенсивність м'якого рентгенівського випромінювання. 1-з увімкнутим потенціалом пригнічення, 2-без потенціалу пригнічення

Було виявлено затримку сигналу випромінювання лінії водню H_{α} при підключеному потенціалі пригнічення приблизно на 1 мс (рис. 14). Також виявлено, що сигнал м'якого рентгенівського випромінювання з плазми, який можна зв'язати з її температурою, за наявності потоку ЕУ приблизно вдвічі вище, ніж у разі пригнічення цього потоку. Це також може свідчити про вплив потоку ЕУ на процеси в плазмі.

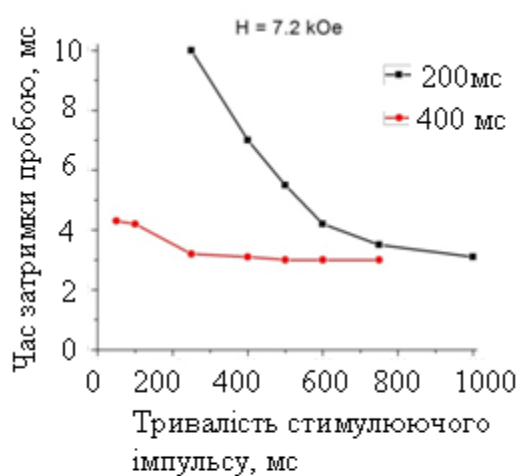


Рис.15. Залежність затримки пробою від тривалості і затримки стимулюючого імпульсу.

затримки для двох часів (200 і 400 мс) щодо початку імпульсу магнітного поля. З графіка видно, що при більшій (400 мс) затримці стимулюючого імпульсу забезпечується мінімальний час основного пробою. Це може говорити на користь того, що заздалегідь створені електрони розрядом-стимулятором, в подальшому багаторазово збільшують кількість породжуваних електронів магнітним полем.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [5,6,7,3.6] та доповідались на конференціях [14,17,18].

Наведені результати експериментів із стимулювання потоків ЕУ. Посилення потоку було отримано при подачі НВЧ імпульсу-стимулятора частотою 2,45 ГГц, потужністю 0,5-1 кВт, який включається в момент досягнення магнітного поля величини 0,8 кЕ (електронно-циклотронний резонанс) на час від 50 мс до 1000 мс. При цьому тиск робочого газу (водень) склав $P=1,6 \cdot 10^{-3}$ Па, створювалася плазма з величиною густини близько $n_e=5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Імпульс НВЧ випромінювання переміщався по фронту магнітного поля, і змінювалася його тривалість. На рисунку 15 зображена залежність інтенсивності потоку ЕУ від

ВИСНОВКИ

Основною метою дисертаційної роботи було вивчення найбільш важливих аспектів взаємодії комплексу ВЧ джерел електромагнітних полів з плазмою в тороїдальних установках Ураган, а саме: вплив плазми на частотний спектр ВЧ струму в антені, на величину внесеного опору навантаження антенного коливального контуру, залежність цього опору від величини магнітного поля і тиску робочого газу, а також вплив різних ВЧ розрядів на кількість відкачуваного газу в процесі очищення вакуумної камери.

1. Уперше на стелараторі Ураган-2М досліджено вплив плазми на навантаження рамкової антени в режимі очищення. Було визначено діапазон величин магнітного поля від 0,03 до 0,055 Тл, де зв'язок рамкової антени з плазмою в режимі очищення є максимальним.

2. При дослідженні спектру струму в рамковій антені виявлені вищі гармоніки основної частоти, що знижує точність усіх ВЧ вимірювань. На основі проведених досліджень удосконалено комплекс ВЧ джерел електромагнітних полів, який забезпечує краще створення і нагрівання плазми імпульсним ВЧ полем в стелараторах Ураган.

3. Шляхом дослідження еволюції параметрів плазми у стелараторі Ураган-3М уперше вивчено режим попередньої іонізації створений джерелом ВЧ поля. Це дало можливість підвищити повторюваність розрядів за рахунок підвищення стабільності часу пробою та скоротити час розвитку подальшого розряду. Впливу попередньої плазми на параметри основного розряду не виявлено.

4. Вперше на стелараторі Ураган-2М проведені експерименти з очищення вакуумної камери безперервним розрядом в УКХ діапазоні на частоті вище за іонно-циклотронний резонанс у комбінації з імпульсними розрядами джерел Каскад. Розроблено ВЧ джерело УКХ розряду і новий метод оцінки динаміки очищення із застосуванням криогенної пастки. Метод дає можливість оперативно оцінювати кількість відкачуваного газу з вакуумної камери, який створюється внаслідок очищення. За допомогою цього методу було визначено необхідну мінімальну тривалість прогрівання вакуумної камери стеларатора Ураган-2М. Було показано, що очищення імпульсними розрядами джерел Каскад одночасно з безперервним УКХ розрядом є ефективнішим, ніж окреме використання таких розрядів. Визначено, що очищення в суміші водню і азоту ефективніша. Цей спосіб очищення є актуальним для установок з надпровідними котушками магнітного поля.

5. Уперше розроблений і досліджений у стелараторах Ураган спосіб пригнічення електронів-утікачів шляхом накладання електричного постійного поля від ВЧ антени рамкового типу, яка відігравала роль електроду. Було виявлено залежність часу створення плазми в режимі придушення ЕУ від тиску робочого газу та від величини напруги придушення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. **V.B. Korovin**, E.D. Kramskoy, “Radio-frequency equipment for Uragan stellarators”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **6** (82), 19-21 (2012). (*Особистий внесок здобувача: розробка та створення складної резонансної системи та конструкції коливальної системи на дводротовій лінії для ВЧ генераторів Каскад, а також пристроїв, що узгоджують опір, експериментальне визначення режимів узгодження ВЧ генераторів Каскад з навантаженням – плазмою при створенні та нагріванні плазми на стелараторах Ураган, написання статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus i Web of Science).
2. D.I. Baron, V.Ya. Chernishenko, **V.B. Korovin**, E.D. Kramskoy, S.M. Maznichenko, V.E. Moiseenko, A.F. Shtan, S.I. Solodovchenko, “Measurements Of Wall Conditioning Rate At Uragan-2m”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **1** (83), 21-23 (2013). (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці, виготовленні, наладці та запуску в роботу УКХ комплексу для ВЧ очищення на установці Ураган-2М, у відпрацюванні режимів ВЧ очищення безперервним розрядом на частоті вище за іонно-циклотронний резонанс, розробив методику оцінки ефективності різних режимів ВЧ очищення стінок камери за допомогою кріогенної вакуумної пастки на установці Ураган-2М, брав участь у її перевірці і відпрацюванні*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus i Web of Science).
3. а) **V.B. Korovin**, V.V. Filippov, M.M. Kozulya, E.D. Kramskoy, A.V. Lozin, “Effect of plasma on the radio-technical characteristics of the URAGAN-2M torsatron matching rf systems”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **6** (94), 41-43 (2014). (*Особистий внесок здобувача: розробка методики визначення величини опору, внесеного плазмою в коливальний контур антени, з вимірювання добротності контуру, вимірювання ВЧ напруги та струмів в антені, обробка і аналіз отриманих результатів, написання статті*). (Видання входить до наукометричних баз Scopus i Web of Science).
3. б) V.E. Moiseenko, I.K. Tarasov, M.I. Tarasov, D.A. Sitnikov, **V.B. Korovin**, A.D. Komarov, A.S. Kozachek, L.I. Krupnik, A.I. Zhezhera, R.O. Pavlichenko, N.V. Zamanov, A.Ye. Kulaga, A.N. Shapoval, M.A. Lytova, S.M. Maznichenko, S.I. Solodovchenko, A.F. Shtan, “Control of the runaway electron flow in torsatron”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **6** (94), 266-268 (2014). (*Особистий внесок здобувача: участь у розробці схеми подання керуючої напруги, постановці експериментів і обробці результатів, написання статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus i Web of Science).
4. **V.B. Korovin**, D.I. Baron, A.B. Lozin, M.M. Kozulya, V.Ya. Chernichenko, E.D. Kramskoy, V.K. Pashnev, M. Mozetič, “RF wall conditioning at the URAGAN-2M using high vacuum cryogenic trap”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **1** (95), 53-55 (2015). (*Особистий внесок здобувача: вдосконалення методики визначення динаміки очищення вакуумної камери, проведення її експериментальної*

апробації, налаштування УКХ генератора на параметри експерименту, розробка конструкції нового пристрою, що погоджує опір, і направленою відгалужувача УКХ генератора, проведення експериментів по УКХ очищенню камери установки Ураган-2М, виявлення режиму максимально ефективного очищення, написання статті). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

5. I.K. Tarasov, M.I. Tarasov, D.A. Sitnikov, **V.B. Korovin**, A.V. Lozin, Yu.K. Mironov, V.S. Romanov, R.O. Pavlichenko, N.V. Zamanov, A.G. Kulaga, A.N. Shapoval, M.M. Makhov, I.G. Goncharov, V.M. Listopad, N.V. Lymar, N.V. Gnidenko, “Amplification of the runaway electrons flow in the URAGAN-3M torsatron”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **6** (118), 38-41 (2018). (Особистий внесок здобувача: обробка і аналіз отриманих результатів, написання статті). (Видання входить до наукометричних баз Scopus і Web of Science).

Наукові праці у зарубіжних наукових фахових виданнях:

6. V. E. Moiseenko, **V. B. Korovin**, I. K. Tarasov, M. I. Tarasov, D. A. Sitnikov, I. E. Garkusha, N. V. Zamanov, M. A. Lytova, R. O. Pavlichenko, A. E. Kulaga, and V. K. Pashnev, “The Effect of an Electrostatic Field on Runaway Electrons in the Uragan3M Stellarator”, Technical Physics Letters. **40**(8), 669-672 (2014). (Особистий внесок здобувача: участь в експериментах, обробка і аналіз отриманих результатів. Дисертант запропонував використати ВЧ антену рамкового типу в якості електрода для пригнічення потоку електронів-утікачів, написання статті). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

7. **V. B. Korovin**, I. K. Tarasov, E. D. Kramskoi, D. A. Sitnikov, N. B. Dreval', A. V. Lozin and M. M. Kozulya, “Suppression of Runaway Electron Flows and Specific Features of Working Gas Breakdown in the Uragan-2M Torsatron”, Technical Physics. **63**(7) 960–964 (2018). (Особистий внесок здобувача: участь у постановці експерименту, розробка схеми підключення пригнічуючої напруги, в проведенні самих експериментів, в обробці та інтерпретації їх результатів, написання статті). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

8. **V.B. Korovin**, Ye.D. Kramskoy, in: Alushta- International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion (NSC KIPT, Alushta, 2012), p.36. (Особистий внесок здобувача: визначення режиму узгодження плазми з генераторами, участь у розробці та створенні коливальних систем ВЧ генератора Каскад, генератора УКХ та К-0, узгоджувальних пристроїв для різноманітних антен).

9. V.E. Moiseenko, A.V. Lozin, V.V. Chechkin, V.Ya. Chernyshenko, L.I. Grigor'eva, Ye.D. Kramskoi, **V.B. Korovin**, M.M. Kozulya, A.I. Lyssoivan, Schebetun A.V., Shapoval A.N., Shtan' A.F., Solodovchenko S.I., Voitsenya V.S. and I.E. Garkusha in: Seventh IAEA Technical Meeting on “Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices”. (Aix en Provence, France, 2013), p. 033009. (Особистий внесок здобувача:

участь у розрахунках опору навантаження УКХ генератора, забезпечення узгодження генератора та навантаження-плазми).

10. **V.B. Korovin**, D.I. Baron, E.D. Kramskoy, S.M. Maznichenko, S.I. Solodovchenko, V.Ya. Shernishenko, A.F. Shtan in: *Alushta- International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion*. (NSC KIPT, Alushta, 2012), p. 37. (Особистий внесок здобувача: розробка схеми експерименту та методики вимірювання динаміки очищення вакуумної камери).

11. V.L. Bereznyj, V.V. Filippov, **V.B. Korovin** et al., in: *Alushta International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion*, (NSC KIPT, Kharkiv, 2014), p. 28. (Особистий внесок здобувача: забезпечення роботи ВЧ генераторів у різних режимах узгодження, вимірювання струму в антені).

12. **V.B. Korovin**, V.V. Filippov, M.M. Kozulya, E.D. Kramskoy, A.V. Lozin in: *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion* (, (NSC KIPT, Kharkiv, 2014), p. 48. (Особистий внесок здобувача: розробка методики визначення величини внесеного опору плазмою в коливальний контур антени з вимірювання добротності контуру, проведення вимірювань, обробка та аналіз отриманих результатів).

13. **V.B. Korovin**, E.D. Kramskoy, M.M. Kozulya, A.B. Lozin, V.E. Moiseenko, D.I. Baron, V.Ya. Shernishenko, V.K. Pashnev in: *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion*, (NSC KIPT, Kharkiv, 2014), p. 49. (Особистий внесок здобувача: забезпечення проведення очищення ВЧ обладнанням, розробка методики контролю за допомогою кріогенної пастки, проведення вимірювань та інтерпретація результатів).

14. V.E. Moiseenko, I.K. Tarasov, M.I. Tarasov, D.A. Sitnikov, **V.B. Korovin**, A.D. Komarov, A.S. Kozachek, L.I. Krupnik, A.I. Zhezhera, R.O. Pavlichenko, N.V. Zamanov, A.Ye. Kulaga, A.N. Shapoval, M.A. Lytova, S.M. Maznichenko, S.I. Solodovchenko, A.F. Shtan in: *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion*, (NSC KIP,T Kharkiv, 2014), p. 192. (Особистий внесок здобувача: розробка схеми пригнічення електронів-утікачів, проведення вимірювань, інтерпретація результатів).

15. V.V. Filippov, **V.B. Korovin**, D.L. Grekov, and E.D. Kramskoy and Uragan – 2M team, in: *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, (NSC KIPT, Харків, 2014), p.43. (Особистий внесок здобувача: створення датчиків струму та вимірювання ВЧ струму в антені, участь у розробці ланцюга фільтру пригнічення гармонік, експериментальне випробування фільтру, проведення вимірювань ВЧ струму в навантаженні).

16. **В.Б. Коровін**, В.Є. Моїсеєнко, В.В. Чечкін, Л.І. Грігор'єва, О.В. Щебетун, Є.Д. Крамской, М.М. Козуля, О.В. Лисойван, В.Я. Чернишенко, Г.П. Глазунов, А.Н. Шаповал, А.Ф. Штань, С.І. Солодовченко, В.С. Войценя, І.Є. Гаркуша in: *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (ІЯФ, Київ, 2013)*, с. 29. (Особистий внесок здобувача: розрахунки опору навантаження, участь у створенні УКХ генератора, забезпеченні його узгодження з антеною і плазмою).

17. **V.B. Korovin**, I.K. Tarasov, E.D. Kramskoy, N.B. Dreval, D.A. Sitnikov, M.M. Kozulya, A.B. Lozin in: *International Conference-Schoolon Plasma Physics and*

Controlled Fusion, (NSC KIPT, Kharkov, 2016), p. 33. (Особистий внесок здобувача: розробка схеми подання керуючої напруги на антену, участь у проведенні вимірювань та аналізу результатів).

18. I.K. Tarasov, M.I. Tarasov, D.A. Sitnikov, **V.B. Korovin**, A.V. Lozin, Yu.K. Mironov, V.S. Romanov, R.O. Pavlichenko, N.V. Zamanov, A.G. Kulaga, A.N. Shapoval, M.M. Makhov, I.G. Goncharov, V.M. Listopad, N.V. Lyman, in: *International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, (NSC KIPT, Kharkov, 2018), p. 41. (Особистий внесок здобувача: участь у проведенні вимірювань та аналізу результатів).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. **В.Б. Коровин**, В.Е. Моисеєнко, О.М. Швець, Авторское свидетельство СССР № 1366033 (24.Січень1985). (Особистий внесок здобувача: участь у забезпеченні експериментального підтвердження можливості застосування складної резонансної системи для створення і нагрівання плазми, оформленні заявки на винахід).

20. **В.Б. Коровін**, В.Є. Моїсеєнко, Патент України №106462 (26 Серпень, 2014). (Особистий внесок здобувача: розробка способу контролю динаміки очищення вакуумної камери, оформлення матеріалів заявки на винахід).

21. A.V. Lozin, V.E. Moiseenko, M.M. Kozulya, E.D. Kramskoj, **V.B. Korovin**, A.V. Yevsyukov, L.I. Grigor'eva, A.A. Beletskii, A.N. Shapoval, M.M. Makhov, A.Yu. Krasnyuk, D.I. Baron and Uragan-2M Team, "Continuous Wall Conditioning VHF Discharge Without Magnetic Field in a Toroidal Device", *Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics.* **6** (106), 60-63 (2016). (Особистий внесок здобувача: участь у проведенні вимірювань та аналізу результатів).

АНОТАЦІЯ

Коровін В.Б. Застосування високочастотних джерел електромагнітних полів у стелараторах Ураган. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Національний науковий центр «Харківський Фізико-Технічний Інститут», Інститут фізики плазми. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. Харків, 2020.

У дисертаційній роботі представлено результати експериментального дослідження взаємодії рамкової антени з плазмою в режимі очищення вакуумної камери. Експериментально вивчений вплив плазми на добротність коливального контуру антени. Встановлено залежність добротності контуру антени від величини магнітного поля та тиску робочого газу. Проведено дослідження спектру ВЧ струму у рамковій антені в режимі очищення, виявлені вищі гармоніки основної частоти. За результатами цих досліджень розроблений пристрій оригінальної конструкції, який забезпечує пригнічення вищих гармонік у лінії передачі ВЧ потужності до навантаження. Вдосконалений комплекс ВЧ пристроїв для створення і нагрівання плазми в стелараторах Ураган, основою якого є унікальні ВЧ джерела

електромагнітних полів Каскад. Представлено результати експериментального дослідження ВЧ очищення вакуумної камери стелараторів, здійснюваного за допомогою цього обладнання. Наведено результати вивчення очищення вакуумної камери безперервним УКХ розрядом на частоті вище іонно-циклотронного резонансу. Експериментально підтверджено можливість використання такого розряду для очищення вакуумної камери стеларатора. Вимірювання підтверджують, що розряд має об'ємний характер. Для контролю динаміки очищення вакуумної камери розроблено новий метод із застосуванням криогенної пастки, який дає можливість оперативно контролювати зміни кількості відкачуваного газу з вакуумної камери. Наведено результати вивчення режиму попередньої іонізації ВЧ методом у смузі частотот 3–7 МГц у вакуумній камері стеларатора Ураган-3М за допомогою розробленого ВЧ джерела Каскад-0, навантаженого на малу рамкову антену. Розроблено спосіб пригнічення електронів-утікачів шляхом створення постійного електричного поля. Досліджено вплив режиму пригнічення на параметри плазми.

Ключові слова: стеларатор, ВЧ методи, генератор, джерело електромагнітних полів, антена, спектр, магнітне поле, очищення вакуумної камери, криогенна пастка, пригнічення електронів утікачів.

ABSTRACT

Korovin V.B. Application of RF sources of electromagnetic fields in Uragane stelarators. - Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in physical and mathematical sciences. Specialty 01.04.08 - Plasma physics. - National Research Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology" Institute of Plasma Physics. - V.N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. - Kharkiv, 2020.

This dissertation presents the results of experimental research of the developed RF sources intended for creation and heating of plasma by pulsed RF fields in Uragane toroidal installations. The study of the influence of plasma on the operation of the created high-power pulsed RF generators Cascade-1 and Cascade-2 is conducted. The results of the experimental study of RF cleaning of the vacuum chamber of stellarators carried out with the help of this equipment are presented. The result of studying the cleaning of a vacuum chamber by a continuous VHF discharge with the help of an improved source of electromagnetic field of the VHF range is presented. The possibility of using such a source, creating a continuous VHF discharge at a frequency above the cyclotron resonance for cleaning the vacuum chamber of the stelarator, has been experimentally confirmed. Measurements also confirm that the discharge is three-dimensional.

To control the dynamics of vacuum chamber cleaning, a new method using a cryogenic trap has been developed, which allows to quickly control changes in the amount of pumped gas from the vacuum chamber. The results of studying the mode of preionization by an electric field in the frequency band 3 to 7 MHz in the vacuum chamber of the Uragane-3M stelarator using a developed and constructed RF source Cascade-0 loaded on a small loop antenna are presented. The use of this field allowed to create a preliminary preionization plasma. The creation of this plasma allowed the development of

further discharge in a shorter and more constant period of time. It is developed a method of electron suppression escaped by creating an electric constant field. The influence of the suppression regime on the plasma parameters was investigated.

Key words: stelarator, RF methods, generator, source of electromagnetic fields, antenna, spectrum, magnetic field, vacuum chamber cleaning, cryogenic trap, suppression of runaway electrons.

АННОТАЦИЯ

Коровин В.Б. Применение высокочастотных источников электромагнитных полей в стеллараторах Ураган. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» Институт физики плазмы. – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2020.

В диссертационной работе представлены результаты изучения взаимодействия с плазмой разработанных и усовершенствованных источников мощных импульсных ВЧ электромагнитных полей Каскад, предназначенных для создания и нагрева плазмы в стеллараторах Ураган. Проведен анализ условий согласования при работе ВЧ источника на антенну рамочного типа. Рассмотрены три режима взаимодействия, возникающие при создании плазмы. Анализ выполнен на основе трансформаторной схемы согласования, которая используется в данных генераторах. При выполнении анализа были учтены особенности антенной системы, изменение вносимого сопротивления антенны во времени, и влияние этого сопротивления на величину вводимой ВЧ мощности в антенну.

Для определение влияния плазмы на колебательный контур антенны, создающей плазму, была разработана методика определения изменения добротности этого контура. Величина добротности определялась по соотношению токов в колебательном контуре и тока в подводящей фидерной линии. Был определен диапазон величин магнитного поля, где связь рамочной антенны с плазмой максимальна. Проанализирован спектр ВЧ тока в рамочной антенне, в котором обнаружены высшие гармоники основной частоты. Предложено новое техническое решение для подавления высших гармоник ВЧ тока в антенне в виде мощного фильтра с использованием отрезка фидерной линии.

Приводится описание ВЧ источников. Генераторы Каскад-1 (2)-это два независимых генератора одинаковой конструкции. Каждый из них подключен к своей антенне. Диапазон рабочих частот от 1 до 20 МГц, с длительность ВЧ импульса до 100 мс. Расчетная мощность одного генератора порядка 0.8 МВт. Генераторы, собраны по схеме двухтактного автогенератора с общим катодом на лампах ГИ–26А. В каждом плече автогенератора подключено по 2 лампы параллельно для увеличения ВЧ тока в нагрузке. Разработаны два варианта колебательных систем генератора. В первом варианте-в качестве индуктивности анодного контура генератора используется короткозамкнутый отрезок двухпроводной линии. Передача ВЧ энергии от генератора к антенне осуществляется по фидерной линии с волновым сопротивлением 25 или 50 Ом. В другом варианте использована сложная колебательная система, образованная длинной фидерной линией передачи ВЧ

мощности и элементами антенного контура. Согласование осуществлялось путем подбора количества фидеров линии передачи. В качестве источника анодного питания используется емкостной накопитель емкостью 1800 мкФ напряжением до 20 кВ.

Для проведения чистки камеры стелларатора Ураган-2М методом непрерывного ВЧ разряда малоплотной плазмой на частоте выше ИЦ резонанса был разработан источник УКВ поля. Он обеспечивает генерацию ВЧ поля с частотой - 130-140 МГц. Выходная мощность порядка 2 кВт, анодное напряжение 1–5 кВ. Для контроля динамики чистки вакуумной камеры разработан новый метод с применением криогенной ловушки, который позволяет оперативно контролировать изменения количества откачиваемого газа из вакуумной камеры. Было обнаружено, что эффективность очистки при комбинированном УКВ+ВЧ разряде в 2–2.5 раза выше, чем при самостоятельном использовании таких разрядов.

Для стабилизации времени пробоя (Δt) в стеллараторе Ураган-3М путем создания предварительной плазмы был разработан ВЧ источник Каскад-0. Он собран по схеме автогенератора с общим катодом на вакуумном триоде типа ГУ-4А и работает в диапазоне частот 6–8 МГц. Выходная мощность составляет порядка 2 кВт. Ионизация рабочего газа создается электрическим полем антенны. Время пробоя (определяемое по свечению линии H_α) уменьшается с 6-8 мс до 3-х мс. И, что самое важное, оно практически постоянно от импульса к импульсу.

Разработан новый метод подавления потоков убегающих электронов (УЭ), возникающих на фронтах магнитного поля, постоянным электрическим полем, при подаче постоянного потенциала на ВЧ антенну рамочного типа, выводы которой не соединены с корпусом установки. Исследовано влияние режима подавления на параметры плазмы. Была замечена задержка начала пробоя рабочего газа по видимому свету из плазмы, по излучению линии водорода H_α примерно на 1–2 мс. Также проведены эксперименты по стимулированию потоков УЭ.

Ключевые слова: стелларатор, ВЧ методы, генератор, источник электромагнитных полей, антенна, спектр, магнитное поле, чистка вакуумной камеры, криогенная ловушка, подавление убегающих электронов.