

НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО–ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В.Н. КАРАЗІНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

Коровін Валерій Борисович

УДК 533.9

ДИСЕРТАЦІЯ
ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ДЖЕРЕЛ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ У СТЕЛАРАТОРАХ УРАГАН

Спеціальність 01.04.08 – фізика плазми

(Фізико-математичні науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.Б. Коровін

Науковий керівник: Моїсєєнко Володимир Євгенович, кандидат фізико-
математичних наук, старший науковий співробітник.

Харків – 2020 р.

АНОТАЦІЯ

Коровін В.Б. Застосування високочастотних джерел електромагнітних полів у стелараторах Ураган. -Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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 НАН України.–Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2020.

У дисертаційній роботі подані результати експериментального дослідження, взаємовпливу ВЧ джерел призначених для створення і нагрівання плазми імпульсними ВЧ полями у тороїдальних установках Ураган і плазмових розрядів.

Подані результати експериментального дослідження впливу плазми на ВЧ обладнання, ВЧ чистки вакуумної камери стелараторів, здійснюваною за допомогою цього обладнання і результати впливу постійного потенціалу, поданого на антену рамочного типу, на потоки електронів, що утікають.

Вперше проведено дослідження впливу плазми на роботу потужних імпульсних ВЧ джерел Каскад-1 та Каскад-2. Вперше наведені результати досліджень впливу плазми, як навантаження, на ВЧ контур антени рамочного типу в стелараторі Ураган–2М. Наведені залежності внесеного плазмою електричного опору в антенний контур від величини магнітного поля, а також від тиску робочого газу в камері установки. Показано, що існує зона в діапазоні магнітних полів від 0,025 до 0,055 Тл, де опір антенного контура 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. Виявлений діапазон тиску нейтрального газу $4,25 \cdot 10^{-3}$ – $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па в якому добротність антенного контура (опір антенного

контура) мало змінюється і має мінімальні значення. З підвищенням тиску відбувається збільшення добротності антенного контура, що призводить до зниження ВЧ потужності, що вводиться в плазму. Дослідження впливу гвинтового магнітного поля на добротність антенного контуру дозволило встановити, що при накладанні гвинтового поля навантаження антенного контура з його підвищенням зменшується, що свідчить про зниження ВЧ потужності, що вводиться в плазму. Наведені схеми модифікованих потужних імпульсних джерел ВЧ полів, призначених для створення і нагріву плазми в стелараторах Ураган. Джерела ВЧ полів, призначені для створення та нагріву плазми, як правило, складаються з пристрою для генерації ВЧ енергії, передачі цієї енергії в навантаження, пристрої узгодження та антен. Особливістю генераторів Каскад 1 і Каскад-2 є те, що режим створення і нагріву плазми є основним режимом роботи для них. В той час як на сучасних великих і середніх установках з вивчення фізики плазми ВЧ пристрої використовуються, переважно в якості джерел для додаткового нагріву, і тільки в режимі чистки вони створюють плазму. Характерною особливістю роботи ВЧ систем, призначених для створення та нагріву плазми, є початок роботи генератора на навантаження-режим близький до режиму холостого ходу (ХХ)-коли розряд ще не відбувся. І після цього-основний час роботи, протягом якого генератор навантажений вже на плазму, в цей момент величина навантаження може складати від декількох долей Ома до десятків Ом (як навантаження, яке включене послідовно з антеною). ВЧ генератори Каскад зконструйовані таким чином, що враховують такий широкий діапазон зміни опору навантаження і дозволяють забезпечити стійку роботу при створенні плазми. Ці джерела можуть працювати в діапазоні частот від 1 до 20 МГц з тривалістю імпульсу до 100 мсек. Розрахована потужність одного генератора при такій тривалості імпульсу приблизно дорівнює 0,8 МВт.

Вперше показаний вплив плазми, створеної одночасними розрядами від імпульсних ВЧ джерел Каскад і безперервного УКХ генератора на

завантаження рамкової антени, за допомогою якої створювалася плазма. У таких режимах відбувається збільшення навантаження антенного контура в 1,1–1,2 рази, в порівнянні з розрядом, що створюється імпульсним генератором Каскад–1.

Показано, що на установці Ураган–2М при роботі на плазмове навантаження в автогенераторі Каскад – 1 виникають режими розузгодження генератора з антеною, що приводить до різкого збільшення амплітуди вищих гармонік основної частоти генерації (до 50% по амплітуді напруги від рівня першої гармоніки) в спектрі вихідного сигналу. У деяких експериментальних режимах роботи стеларатора, коли в плазму вводилася ВЧ енергія від двох джерел електромагнітних полів одночасно, за час генерації ВЧ імпульсу, були зафіксовані, щонайменше, вісім різних комбінаційних частот крім двох основних. Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що процеси, що відбуваються в плазмі під час ВЧ імпульса, впливають як на величину основної частоти генерованих коливань, її гармонік так і їх амплітуду. Також в процесі розряду виникають комбінаційні частоти, що дорівнюють сумі різниці основної та інших вищих гармонік обох генераторів в різних їх поєднаннях.

У таких умовах у виміри потужності, що передається в антену за допомогою направленої відгалужувача, вноситься похибка, визначувана рівнем гармонік у ВЧ лінії передачі, де розташований даний вимірювальний пристрій – направлений відгалужувач. Розроблений пристрій, що забезпечує придушення вищих гармонік основної частоти і здатний працювати при рівнях ВЧ потужності мегаватного діапазона. Вживання даного пристрою дозволило усунути всі гармоніки основної частоти вище другої, друга гармоніка ослаблялася на 5-8 дБ.

Вдосконалений комплекс ВЧ пристрійів, призначений для чистки вакуумної камери безперервним УКХ розрядом. Експериментально підтверджена можливість використання безперервного УКВ розряда на частоті вище іонно-циклотронного резонансу (ІЦР) для здійснення чистки

вакуумної камери стеларатора. Наведені результати ВЧ очищення вакуумної камери стеларатора Ураган-2М за допомогою даного розряду в атмосфері водню і гелію, а також в атмосфері суміші водню і азоту.

Створено та вивчено режим попередньої іонізації електричним полем в смузі частотот 3 - 7 МГц у вакуумній камері стеларатора Ураган-3М за допомогою розробленого і побудованого ВЧ джерела Каскад-0, навантаженого на малу рамкову антену. При використанні режиму попередньої іонізації час пробою зменшувався і був постійним. Використання цього поля дозволило створити попередню слабкострумову плазму. Наявність цієї плазми дозволила розвивати подальший розряд за більш короткий проміжок часу. Причому, стабільність часу пробою різко зросла, що дозволило виконати широтно-імпульсні вимірювання параметрів плазми. На параметри основного розряду попередньої іонізації плазма, практично, не впливає.

Розроблений і випробуваний метод оперативної оцінки ефективності проведення очищення вакуумної камери за допомогою кріогенної пастки. У методі використовується здатність деяких газів, що виділяються у вакуумній камері при проведенні очищення, конденсуватися на охолодженій поверхні кріогенної ловушки. Приведені результати вимірювань даним методом ефективності різних режимів очищення стінок вакуумної камери установки Ураган-2М. Вживання даного методу при прогріванні вакуумної камери дозволило визначити ефективність чистки УКХ безперервним розрядом, а також, що прогрівання стінок камери стеларатора Ураган-2М досить здійснювати протягом 40 годин замість 100, як робилося раніше.

Вперше розроблена і досліджена методика придушення електронів утікачів (ЕУ) у стелараторах, що виникають на фронтах імпульсу утримаючого магнітного поля, за допомогою постійного електричного потенціалу, що подається на ВЧ антену. Вивчені різні режими придушення в залежності від величини потенціалу. Експериментально підтверджена та вивчена можливість придушення потоку ЕУ за допомогою подачі

імпульсного потенціалу, що пригнічує, на працюючу ВЧ антену. Експериментально досліджений вплив потоку ЕУ на параметри створюваної плазми і на умови роботи ВЧ генератора. В якості електрода, на який подавався потенціал, що пригнічує, використовувалася ВЧ рамкова антена. Виявлено залежність придушення ЕУ від величини потенціалу, що пригнічує. Дослідження впливу режиму придушення (подачі потенціалу) на ВЧ антену-електрод вперше показало, що такий потенціал призводить до подовження фронту наростання лінії оптичного випромінювання водню H_{α} , яке супроводжується зниженням амплітуди сигналу H_{α} . Грунтуючись на експериментальних результатах, отриманих в даній роботі, можна стверджувати, що наявність постійного потенціалу на антені перешкоджає лавинному утворенню потоку заряджених часток в камері стеларатора.

Також були проведені експерименти по стимулюванню потоку ЕУ, що виникають на фронті імпульсу магнітного поля в стелараторі Ураган-2М. Такий режим передбачається використовувати як варіант режиму попередньої іонізації.

Було виявлено, що при стимулюванні утворення плазми в області утримання на стадії зародження і прискорення заряджених частинок (на передньому фронті імпульсу магнітного поля) досягається посилення потоку ЕУ. На його величину впливають параметри плазми і час інжекції, що опосередковано можна визначити через тривалість і амплітуду імпульсів ВЧ генераторів - стимуляторів. Величина потоку електронів втікачів залежить також від затримки імпульсу генератора-стимулятора від початку імпульсу магнітного поля.

Ключові слова: стеларатор, ВЧ методи, генератор, джерело електромагнітних полів, антена, спектр, магнітне поле, очищення вакуумної камери, кріогенна пастка, придушення електронів втікачів.

ABSTRACT

Korovin V. B. Application of RF sources of electromagnetic fields in Uragane stellarators.

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 Thesis focuses on the main methods of experimental scientific on the interaction of RF sources designed to create and heat plasma by pulsed RF fields in toroidal Uragane installations and plasma discharges.

The thesis includes the results of experimental research of the impact of RF cleaning of the vacuum chamber of stellarators, carried out with the help of given equipment, and the impact of the constant potential, applied to the frame type antenna, on the flowing electrons.

The complex of HF devices designed for cleaning the vacuum chamber with a continuous VHF discharge has been improved. The possibility of using a continuous VHF discharge at a frequency above the ion-cyclotron resonance for cleaning the vacuum chamber of the stellarator has been experimentally confirmed. The results of RF cleaning by such discharge in an atmosphere of hydrogen and helium are presented.

The creation and study of the preionization mode by an electric field in the frequency band 3 to 7 MHz in the vacuum chamber of the Uragan-3M stellarator was carried out with the help of the developed and constructed RF source Kaskad-0 loaded on a small frame antenna. When using the preionization mode, the breakdown time decreased and was constant. 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 period of time. Moreover, the stability of the breakdown time increased sharply, which allowed to perform pulse-width

measurements of plasma parameters. The parameters of the main discharge are practically not affected by plasma preionization.

For the first time, a study of the effect of plasma on the operation of the created high-power pulsed RF sources Kaskad -1 and Kaskad -2 was carried out. It is shown that at the Uragane-2M installation, when working on plasma load, in the Kaskad-1 autogenerator there are modes of mismatch of the generator with the antenna, which leads to a sharp increase in the amplitude of higher harmonics of the basic frequency (up to 50% of the first harmonic level) in outgoing signal. Under such conditions, an error determined by the level of harmonics in the RF transmission line, where this measuring device is located, is introduced into the measurement of the power transmitted to the antenna by means of a directional coupler. A device has been developed that provides suppression of higher harmonics of the basic frequency and is able to operate at RF power levels in the megawatt range. The use of this device allowed to eliminate all harmonics of the fundamental frequency above the second, the second harmonic was weakened by 5-8 dB. For the first time, the results of studies of the effect of plasma as a load on the RF circuit of the frame-type antenna in the Uragane-2M stellarator are presented. The dependences of the electrical resistance of the antenna circuit introduced by the plasma on the magnitude of the magnetic field, as well as on the pressure of the working gas in the installation chamber are presented. It is shown that there is a zone in the range of magnetic fields from 0.025 to 0.055 T, where the resistance of the antenna circuit does not change. It is established that the increase in antenna load occurs when the field values are less than 0.02 T, as well as when the magnetic field increases, starting from the value of 0.055 T. The maximum was reached at $B = 0.07$ T. It was found that under pressure range of the neutral gas from $4.25 \cdot 10^{-3}$ to $6.65 \cdot 10^{-3}$ Pa the quality factor of the antenna circuit varies little and has minimal values. When increasing pressure, there is an increase in the quality factor of the antenna circuit, which leads to a decrease in RF power input to the plasma. The study of the influence of the helical magnetic field on the quality factor of the antenna circuit allowed to establish that when applying the helical field, the antenna circuit load decreases with its

increase, which indicates a decrease in RF power introduced into the plasma. For the first time the influence of the plasma created by simultaneous discharges from pulsed RF sources Kaskad-1, Kaskad-2 and the continuous VHF generator on the frame antenna loading by means of which plasma was created is shown. In such modes there is a 1.1–1.2 times increase in the load of the antenna circuit as compared with the discharge generated by the pulse generator Kaskad-1.

A method of operative evaluation of the efficiency of vacuum chamber cleaning has been developed and tested. The method uses the ability of some gases released in the vacuum chamber during cleaning to condense on the cooled surface of the cryogenic trap. The results of measurements of the efficiency of various modes of cleaning the walls of the vacuum chamber of the Uragane-2M by this method are provided. The use of this method when heating the vacuum chamber allowed to determine the efficiency of cleaning VHF with a continuous discharge, as well as to show that it is enough to heat the walls of the chamber of the stellarator Uragane-2M for 40 hours instead of 100, as it used to be done previously.

For the first time, a method of suppressing runaway electrons (RE) in stellarators arising on the pulse fronts of the holding magnetic field by means of a constant electric potential applied to the RF antenna was developed and studied. Different modes of suppression depending on the magnitude of the potential have been studied. The possibility of suppressing the RE flux by applying a suppressing pulse potential to a working RF antenna has been experimentally confirmed and studied. The influence of the RE flux on the parameters of the generated plasma and on the operating conditions of the RF generator has been experimentally investigated. The RF frame antenna was used as the electrode to which the predominant potential was applied. The dependence of RE suppression on the magnitude of the suppressive potential is obtained. A study of the effect of the suppression mode (potential supply) on the RF antenna - electrode showed for the first time that such a potential leads to an elongation of the front of the line of optical radiation of hydrogen H_{α} , which is accompanied by a decrease in the amplitude of the H_{α} signal. Based on the experimental results obtained in this work, it can be argued that the presence of a

constant potential on the antenna prevents the avalanche formation of the flow of charged particles in the stellarator chamber.

Experiments were also conducted to stimulate the flow of RE arising at the front of the pulse of the magnetic field in the stellarator Uragane-2M. This mode is supposed to be used as a variant of the preionization mode. It was found that by stimulating the formation of plasma in the area of r confinement at the stage of nucleation and acceleration of charged particles (on the leading front of the pulse of the magnetic field) is achieved by increasing the flow of RE. Its value is influenced by plasma parameters and injection time, which can be indirectly determined by the duration and amplitude of the pulses of RF generators-stimulators. The magnitude of the flux of fugitive electrons also depends on the delay of the pulse of the generator-stimulator relative to the beginning of the pulse of the magnetic field.

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

Основні положення дисертації надруковані у наступних наукових працях:

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 криогенної 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. Lyman, 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 Fusion (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 Fusion*. (NSC KIPT, Alushta, 2012), p. 37. (Особистий внесок здобувача: розробка схеми експерименту та методики вимірювання динаміки очищення вакуумної камери).

11. V.L. Berezhnyj, V.V. Filippov, **V.B. Korovin** et al., in: *Alushta International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, (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 Fusion* (, (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 Fusion*, (NSC KIPT, Kharkiv, 2014), p. 49. (Особистий внесок здобувача: забезпечення проведення очищення ВЧ обладнанням, розробка методики контролю за допомогою криогенної 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 Fusion*, (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. Войцєня, 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-School on 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. Lymar, 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. Коровін**, В.Е. Моїсеєнко, О.М. Швеє, 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).

ЗМІСТ

ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. ГЕНЕРАЦІЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВЧ ЕЛЕКТРО – МАГНІТНИХ ПОЛІВ В ТЕРМОЯДЕРНИХ УСТАНОВКАХ.	27
1.1. Методи ВЧ очищення вакуумної камери	27
1.2. ВЧ системи іонно-циклотронного (ІЦ) нагрівання	29
1.3. ВЧ методи у сучасних стелараторах	31
1.4. ВЧ джерела електромагнітних полів	35
1.5. Управління потоками електронів-утікачів (ЕУ)	36
Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2. ВЗАЄМОДІЯ ПЛАЗМИ З ВЧ АНТЕНОЮ ТА ДЖЕРЕЛОМ ВЧ ПОЛЯ	41
2.1. Вплив плазмового навантаження на радіотехнічні характеристики ВЧ системи у стелараторі Ураган 2-М	41
2.2. Оцінка ступеня взаємодії антени з плазмою	45
2.3. Вдосканалені ВЧ джерела Каскад, для створення і нагріву плазми в стелараторах Ураган	52
2.4. Особливості вимірювань ВЧ параметрів на стелараторах Ураган	65
2.5. Придушення гармонік у лінії передачі ВЧ потужності в антену	73
2.6. Створення режиму попередньої іонізації у стелараторі Ураган – 3М	75
Висновки до розділу 2	78
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ОЧИЩЕННЯ ВАКУУМНОЇ КАМЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ КРІОГЕННОЇ ПАСТКИ	80
3.1. Спосіб оцінки динаміки процесу очищення вакуумної камери	80

3.2.	Джерело УКХ поля для чищення вакуумної камери безперервним розрядом на частоті вище за ІЦР.	85
3.3.	Вимір динаміки очищення УКХ безперервним розрядом в стелараторі Ураган-2М	90
3.4.	Поєднання безперервного УКХ розряду на частоті вище ІЦР з іншими видами розрядів для очищення	95
3.5.	УКХ очищення в атмосфері гелію	100
3.6.	УКХ очищення в атмосфері суміші водню і азоту	102
	Висновки до розділу 3	107
	РОЗДІЛ 4. УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ ЕЛЕКТРОНІВ УТІКАЧІВ (ЕУ) У СТЕЛАРАТОРАХ УРАГАН	109
4.1.	Теоретичне обґрунтування способу впливу електростатичного поля на потік ЕУ в стелараторах	109
4.2.	Експериментальні дослідження впливу постійного потенціалу на потоки ЕУ в стелараторі Ураган - 3М	114
4.3.	Експериментальні дослідження впливу постійного потенціалу на потоки ЕУ в стелараторі Ураган - 2М	117
4.4.	Вплив потоку ЕУ на параметри плазми	122
4.5.	Стимулювання потоків ЕУ в стелараторі з імпульсним магнітним полем	126
	Висновки до розділу 4	131
	ВИСНОВКИ	133
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	135
	ДОДАТКИ	150
	ДОДАТОК 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації	151
	ДОДАТОК 2. Довідка про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи	155

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку науки вирішальна роль в здійсненні проекту практичного застосування накопичених знань в галузі фізики плазми належить вже фахівцям, які використовують останні досягнення науки, техніки і технології. Приклад тому-роботи по створенню термоядерних енергетичних установок-це один з перспективних напрямків майбутнього розвитку енергетики. В даний час найбільш значним проектом в цій області є робота зі створення Міжнародного термоядерного експериментального реактору (ІТЕР). Про важливість і значення застосування на практиці наукових розробок на шляху створення термоядерних реакторів свідчать регулярні міжнародні конференції.

У процесі розвитку теорії фізики плазми та накопичення нових припущень щодо можливості застосування ВЧ способів створення і нагріву плазми виникала необхідність проведення експериментів для їх перевірки. У зв'язку з цим потрібно розробляти, конструювати і створювати різні машини, пристрої, прилади та механізми, аналогів яким не існувало. Згодом з'являлася необхідність збільшувати робочі напруги ВЧ пристроїв, густину струму в антенах, потужність, що вводиться в ВЧ антени. Так, наприклад, на стелараторі Ураган-3 ВЧ потужність планувалася до 2 МВт, температура іонів до 500 ЕВ [1, 2]. А для стеларатора LHD: для іонно-циклотронного (ІЦ) нагріву-до 9 МВт і 2.7 МВт-для електронно-циклотронного. Електронна температура 10 кЕВ, іонна-5 кЕВ, 1,16 МДж накопиченої енергії [3-5]. Для токамака ІТЕР потужності додаткового ВЧ нагрівання: на частоті нижнегібридного резонансу-5 ГГц-50 МВт, на частоті іонно-циклотронного-15-80 МГц-130 МВт, на частоті електронно-циклотронного-120 ГГц-20 МВт.

Таке підвищення робочих напруг і потужностей спричинило за собою розробку і виготовлення імпульсних високовольтних накопичувачів, нових пристроїв для генерації ВЧ енергії (гіротрони), спеціальних антенних введень, ліній передачі ВЧ енергії, узгоджувальних пристроїв і ВЧ ізоляторів

тощо. Зросла тривалість ВЧ імпульсу від мікросекунд до сотень секунд, що практично можна вважати безперервним режимом роботи ВЧ пристроїв. Підвищилися вимоги до високовольтної ізоляції для всіх ВЧ пристроїв. Для контролю та управління ВЧ технікою потрібні нові датчики, вимірювальні прилади та пристрої дистанційного керування, оскільки всі вони повинні працювати в умовах впливу різноманітних і потужних перешкод, таких як електромагнітні, механічні, теплові, випромінювання на частотах 170 ГГц і 60 ГГц. Інженерні аспекти створення діагностики випромінювання електронно-циклотронного діапазону є хорошим прикладом для ілюстрації всіх цих проблем [6].

За 60 років розвитку фізики плазми потрібно було вирішити багато складних проблем, в їх числі: створення глибокого вакууму в великих обсягах, розробка великих надпровідних магнітів, вибір і випробування різних конструкційних матеріалів для різних вузлів і конструкцій, створення потужних лазерів, гіротронів і джерел рентгенівського випромінювання, розробка високовольтних імпульсних систем живлення, розробка методів і створення пристроїв для ВЧ нагрівання і багато іншого.

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Високочастотні (ВЧ) методи створення і нагрівання плазми відомі давно. Ще в п'ятдесяті роки минулого сторіччя з'ясувалося, що для здобуття термоядерної температури, окрім омичного нагріву, необхідно шукати додаткові способи нагрівання плазми. На теперішній час ВЧ методи нагрівання широко використовують на сучасних, що діють, і на нових установках, що будують. У стелараторах Ураган–2М і Ураган–3М (Україна, Харків) традиційно застосовують метод створення і нагрівання плазми на частоті іонного-циклотронного резонансу (ІЦР). Метод ІЦР також застосовують як додатковий спосіб нагрівання плазми на багатьох установках, наприклад: стеларатори - надпровідний – LHD (Японія), в Німеччині–новітній Wendelstein-7х, це на сьогодні найбільший стеларатор у світі; токамаки: JET у Великобританії, ASDEX-U у Німеччині, і звичайно, на

найбільшому в світі міжнародному токамаку ITER, що будується, так само планують використовувати метод ЩР. ВЧ розряди також застосовують для проведення очищення стінок вакуумної камери. На установці Ураган-3 в 1987 р. в ХФТІ під керівництвом Н.І. Назарова був розроблений і вперше в світі застосований метод ВЧ очищення вакуумних камер термоядерних установок. Сьогодні ВЧ чищення застосовують практично на всіх великих і середніх термоядерних установках у світі. Тому ретельне вивчення взаємодії ВЧ випромінювання з плазмою, розробка, створення та експериментальне дослідження роботи ВЧ комплексів і окремих вузлів ВЧ обладнання, проблеми придушення потоків електронів утікачів (ЕУ) є невід'ємною частиною всіх міжнародних програм, направлених на досягнення КТС.

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). Дослідження високочастотного утворення та нагріву плазми, а також її утримання у тороїдальних магнітних пастках стелараторного типу з диверторною і лімітерною конфігурацією. Проробка концепції ядерно-термоядерного підкритичного реактора на основі стеларатора. № держреєстрації 0116U006160.

П-3/22 (2017-2019). Дослідження в стелараторах Ураган-2М та 3М структури плазмового шнура, МГД активності плазми та ВЧ способів створення і нагріву плазми. № держреєстрації 0117U005084.

ІІІ-3-11 (2011-2015). Дослідження ВЧ методів створення і нагріву плазми з низькими частотами зіткнень та утримання її в стелараторних пастках з різними характеристиками магнітної конфігурації. № держреєстрації 0111U009608.

Х-5-5 (2011-2012). Розробка та впровадження на установці У-2М комбінованої магнітної конфігурації стеларатора з відкритою пасткою як прототипу конфігурації нейтронного джерела підкритичної гібридної

системи «ядерне ділення-синтез» та інсталяція корпускулярної діагностики. № держреєстрації 0111U009604.

П-3/22 (2014-2015). Експериментальне і теоретичне моделювання фізичних процесів у великих термоядерних установках з дивертором. № держреєстрації 0114U001808.

Х-5-3 (2013-2015). Розробка та впровадження нового методу діагностики плазми на основі багаточастотної надвисокочастотної рефлектометрії на установці УРАГАН-2М і утримання плазми в комбінованій магнітній конфігурації стеларатора з відкритою пасткою для моделювання нейтронного джерела підкритичної гібридної системи «ядерний поділ-синтез». № держреєстрації 0113U006380.

Україна-Словенія, М/294-2013, М/124-2014. Проведення досліджень ефективності чистки стінок вакуумної камери установки Ураган-2М в різних режимах утворення ВЧ плазми з залученням оптичних, зондових та мас-спектрометричних вимірювань.

Проект Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) №4216. Радіочастотне утворення і нагрів плазми в стелараторі Ураган-2М.
Проект Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) №6057. Критичні питання взаємодії плазми з поверхнею в міжнародному термоядерному реакторі ІТЕР.

ІІІ-3-16 (ІФП). 2016-2020 Дослідження високочастотного утворення та нагріву плазми, що утримується у тороїдальних магнітних пастках стелараторного типу. № держреєстрації 0116U006160.

Мета й завдання дослідження. Метою дослідження є вивчення важливих аспектів взаємодії ВЧ джерел 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

потоків електронів-утікачів, а також впливу ВЧ розрядів різних режимів на процеси очищення стінок вакуумної камери.

Для досягнення поставленої в дисертаційній роботі мети сформульовані та вирішені наступні задачі:

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 вакуумної камери безперервним розрядом в УКХ діапазоні на частоті вище за ІЦР. Для цього розробити відповідне джерело та методику.
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 дослідження—процес ВЧ очищення, створення та нагрівання плазми ВЧ електромагнітними полями, а також утворення потоків електронів-утікачів в установках з тороїдальною магнітною системою та імпульсним магнітним полем.

Предмет дослідження—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 управління 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 і ВПТО-2. Рівень сигналу електронного синхротронного випромінювання визначався (якісно) за інтенсивністю випромінювання на другій гармоніці електронної-циклотронної частоти з центральної області плазмового шнура. Радіотехнічні параметри (ВЧ струм в антені, ВЧ напруга на антенному вході та на елементах генераторів, ВЧ потужність, що віддається генераторами, навантаження антенного контуру) вимірювалися за допомогою спеціально розроблених високовольтних ВЧ подільників напруги та датчиків струму, а також направлених відгалужувачів. Зміна температури криогенної пастки на етапі її відігрівання контролювалася за допомогою напівпровідникового перетворювача, що заздалегідь калібрувався. Поява потоку ЕУ визначалася з наявності жорсткого рентгенівського випромінювання, яке фіксувалося за допомогою сцинтилятора фотоелектронного помножувача ФЕП-19, 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 придушення потоку високоенергетичних частинок (електронів) на фронті та спаді магнітного поля постійним потенціалом, що подається на ВЧ антену рамкового типа.

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 розроблена методика 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 ЦР, 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 кріогенної 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 електронів утікачів. Також, 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 при її нагріванні, в робочих режимах 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 в стелараторі Ураган-3М. Вивчення режиму попередньої іонізації не виявило впливу попередньої плазми на параметри основного розряду.

Внаслідок дослідження очищення вакуумної камери стеларатора Ураган-2М повільною хвилею на частоті 130 МГц (що перевищує частоту іонного циклотронного резонансу) за допомогою розробленого джерела електромагнітного поля цей метод постійно використовують при підготовці стелараторів до проведення експериментів. Перевага цього методу очищення ВЧ полем на частоті вище іонного циклотронного резонансу полягає в тому, що його можна реалізувати в магнітному полі. Це 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 потужних ВЧ генераторів Каскад-1 і Каскад-2 в імпульсному режимі (тривалість десятки мс) з працюючим у безперервному режимі УКХ генератором.

Використання способу оцінки динаміки очищення вакуумної камери за допомогою кріогенної пастки дало можливість скоротити витрати часу при здійсненні ВЧ очищення і при напрацюванні нових методів очищення на стелараторі Ураган-2М. Спосіб дає можливість здійснити економію

електроенергії, ресурсу роботи всієї термоядерної установки та знизити трудомісткість.

Запропонований спосіб пригнічення потоків ЕУ з використанням уже наявної в камері установки ВЧ антени, електрично не зв'язаної з її корпусом, не вимагає введення додаткових пристроїв у вакуумний простір установки. Це має велике значення в великих установках, де потоки ЕУ можуть досягати значних величин, а розміщення додаткового устаткування усередині вакуумної камери ускладнено.

Публікації. Результати роботи повністю відображено у 21 наукових працях, 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. В роботі [1] (нумерація згідно з додатком 1) здобувач розрахував і розробив складну резонансну систему; розрахував, розробив і налагодив коливальні контури та ланцюги зворотного зв'язку ВЧ генераторів Каскад-1 і Каскад-2. Брав участь у розробці та випробуваннях високовольтних ВЧ антенних входів на установці Ураган-2М. Також здобувач брав активну участь у розробці, створенні та вивченні пристроїв, що погоджують опір, для рамкової, трьох- та чотирьох-напів-виткових антен, ВЧ перемикача фідерів і баластного потужного ВЧ навантаження. Дисертантом експериментально визначені режими узгодження ВЧ генераторів Каскад-1 і Каскад-2 з навантаженням – плазмою в режимах створення та нагрівання плазми у стелараторах Ураган-2М і Ураган-3М.

У публікації [2] здобувач брав визначальну участь у розробці, виготовленні, наладці та запуску в роботу УКХ комплексу для ВЧ очищення на установці Ураган-2М, в оптимізації режимів ВЧ очищення безперервним розрядом на частоті вище за іонно-циклотронний резонанс. Дисертант самостійно розробив методику оцінки динаміки різних режимів ВЧ очищення стінок камери за допомогою кріогенної вакуумної пастки на установці Ураган-2М; брав участь у її перевірці та відпрацюванні. Авторіві належить провідна роль

в оформленні матеріалів заявки на винахід за способом контролю ступеню очищення вакуумної камери.

У роботах [3.а] здобувач самостійно розробив методику визначення величини опору, внесеного плазмою в коливальний контур антени, з вимірювання добротності контуру, виміряв ВЧ напругу та струми в антені. Проводив вимірювання та займався обробкою та аналізом здобутих результатів.

У статті [4] здобувачем було вдосконалено методику визначення динаміки очищення вакуумної камери, проведено її експериментальну апробацію. Також дисертант брав участь у налаштуванні УКХ генератора на параметри експерименту, в розробці конструкції нового пристрою, що погоджує опір, і в проведенні експериментів з УКХ очищення камери установки Ураган-2М. Дисертант запропонував конструкцію узгоджувача ВЧ фідерів передавальної лінії, а також самостійно розробив конструкцію направленої відгалужувача УКВ генератора. При проведенні аналізу отриманих результатів дисертантом виявлений режим максимально ефективного очищення при одночасній роботі декількох ВЧ генераторів.

У роботах [5,6] дисертант брав участь у підготовці експериментів з пригнічення потоку ЕУ, у проведенні самих експериментів, в обробці та інтерпретації їх результатів. Дисертант запропонував застосувати використовувану в експериментах ВЧ антену рамкового типу як електрод для пригнічення потоку високоенергетичних заряджених частинок. Автор брав також участь у підготовці матеріалів до публікації.

У роботах [7,21] здобувач брав активну участь у підготовці експерименту, займався проведенням вимірювань, аналізом і обробкою результатів.

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

1. International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoin Workshop “Nano-and micro-sized structures in plasmas”. 2012г. Alushta (Crimea), Ukraine. September 17–22, 2012.

2. Seventh IAEA Technical Meeting on “Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices”. 14-17 May 2013. Aix en Provence, France.
3. Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу. 2013. 24-25 вересня, Київ.
4. PLASMA-2013: International Conference on Research and Applications of Plasmas. Warsaw, Poland, 2–6 September 2013.
5. International Conference - School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoin Workshop “Nano-and micro-sized structures in plasmas”. Kharkiv, Ukraine. September 15 – 18, 2014.
6. Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу. Київ. 24-25 вересня, 2015.
7. International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion. Kharkiv, Ukraine. September 12 – 15, 2016.
8. International Conference - School on Plasma Physics and Controlled Fusion. Kharkiv, Ukraine. September 10-13, 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.

РОЗДІЛ 1.

ГЕНЕРАЦІЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВЧ ЕЛЕКТРО - МАГНІТНИХ ПОЛІВ В ТЕРМОЯДЕРНИХ УСТАНОВКАХ

1.1 ВЧ методи очищення вакуумної камери

Для отримання плазми високої густини з високою температурою необхідно запобігти попаданню в плазму легких і важких домішок. З цією метою в установках проводиться підготовка (кондиціонування, очищення) стінок вакуумної камери. На сучасних термоядерних установках для такої підготовки застосовуються наступні основні методи: прогрів стінок (внутрішній або зовнішній), тліючий (постійний або ВЧ), індукційний (Тейлоровскій) розряди, розряди з використанням ЕЦР і ІЦР, а також нестійкі плазмові розряди при зниженому тороїдальному магнітному полі і СВЧ - розряди.

Прогрівання камери використовують на початковій стадії процесу очищення для видалення води з поверхні стінок вакуумної камери і конструкцій з вуглецевих матеріалів. Прогрівання стінок камери здійснюється до температур, які обумовлені конструктивними особливостями кожної конкретної установки. Зазвичай це становить $150\div 400^{\circ}\text{C}$. Прогрівання здійснюють або омичним способом, пропускаючи електричний струм по стінках камери, або використовуючи різні нагрівачі. Так, наприклад, в установці ІТЕР, прогрівання камери буде здійснюватися водою, нагрітою до 220°C під тиском 4 МПа [7].

Плазмовий розряд зі змінним струмом (Тейлоровскій розряд) в атмосфері водню (дейтерію) ефективно видаляє з поверхні камери моношари атомів кисню [8]. Очищення таким розрядом відноситься до так званих хімічних методів чистки. Тут використовується хімічна реакція водню (дейтерію) з киснем з утворенням води. Для даного розряду необхідно, щоб стінки вакуумної камери мали досить високий електричний опір. У сучасних же установках ця умова не виконується тому, що на даному етапі розвитку

техніки стінки вакуумних камер виготовляють з товстої сталі, що забезпечує їх низький омичний опір.

Найбільш широко відомий спосіб і такий, що постійно застосовується, завдяки своїй відносній технічній простоті реалізації та ефективності, тліючий розряд (radio-frequency glow discharge) [9]. Його використовують для різних цілей. Наприклад, в атмосфері водню даний розряд добре видаляє кисень, в гелії—видаляє водень зі стінок камери, а в середовищі важких інертних газів—ксеноні або аргоні—видаляє карбідні плівки зі стінок. Розрізняють тліючий розряд з використанням постійного і ВЧ струму. Недоліком цього типу розряду вважається неможливість його застосування на установках з надпровідними котушками магнітного поля, де магнітне поле не вимикається.

НВЧ-розряд ефективний для очищення поверхонь у вузьких проміжках конструкцій всередині вакуумної камери. НВЧ розряд широко застосовувався на різних установках TEXTOR [10], JFT-2 [11], JIPP-II [12].

Найбільш перспективним методом в умовах наявності тороїдального магнітного поля є іонно-циклотронне (ІЦР) очищення стінок вакуумної камери. Цей метод використовується в токамаках великого розміру [13,14]. На установці TEXTOR [15], на установці НТ-7 [16] було показано, що даний метод забезпечує практично на порядок ефективніше очищення на ЕЦР.

У токамаці ITER було прийнято рішення використовувати практично всі відомі на сьогоднішній день методи плазмового очищення стінки камери реактора. На першому етапі буде застосован термодесорбційний прогрів дивертора без накладення магнітного поля. Температура прогріву складе 200 -350°C. На наступному етапі буде здійснюватися очищення тліючим розрядом в атмосфері H_2 , D_2 , He і O_2 . Швидкість відкачки складе 30-40 m^3/s . Такий метод очищення можливий при наявності магнітного поля з індукцією до 0,015 Тл [17]. На третьому етапі включається добре відомий метод ЕЦР очищення. На установці ITER він буде проводитися на частоті 170 ГГц в атмосфері H_2 , D_2 , He і O_2 . Тривалість очищення між імпульсами~500 с.

Очікується, що ВЧ потужність складе 100-400 кВт, робочий тиск 0,01-0,1 Па, індукція тороїдального магнітного поля 5,3 або 2,65 Тл, максимальна продуктивність відкачки $4 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Також в ІТЕР для очищення першої стінки передбачається проводити іонно-циклотронне (ІЦ) очищення на частоті 40-55 МГц, при проектній ВЧ потужності приблизно 3,5 МВт. Метод ІЦР очищення буде здійснюватися в середовищі гелію чи дейтерію з метою видалення кисню. У другому випадку ефективність видалення з камери кисню в 5-7 разів вище [18,19].

1.2 ВЧ системи іонно-циклотронного (ІЦ) нагрівання

Як правило, система ІЦРФ (ICRF) (ВЧ нагрівання на частоті іонного циклотронного резонансу) нагрівання включає в себе ВЧ генератор, лінію передачі, систему узгодження, антену і вакуумні антенні вводи, блок вимірювання плазмового навантаження, блок збору даних, високовольтну систему живлення, фазообертач і вимикач постійного струму.

Про застосування систем ІЦ ВЧ чистки в світі і, зокрема на установі EAST сказано в [20,21]. На установці EAST така система складається з 4-х ВЧ генераторів по 1,5 МВт кожен, які працюють в діапазоні частот 30-110 МГц. Для налаштування ВЧ системи створений еквівалент навантаження відповідної потужності, який підключається до лінії передачі замість антени спеціальним перемикачем.

Система ІЦ ВЧ чистки на токамаці ASDEX містить чотири ВЧ генератора потужністю 1,5 МВт (з можливістю перебудови між 30 і 115 МГц). Кожен генератор з тривалістю імпульсу до 10 с. був підключений до одного полюса напіввитка антени. Для введення ВЧ потужності в плазму встановлені дві звичайні неохолоджувані рамкові антени. Кожна антена складалася з двох полоїдально розташованих $\lambda/4$ рамок і живиться з обох кінців. Антени були встановлені діаметрально протилежно на стороні з низьким магнітним полем. Щоб зменшити опір поверхні, антени були виготовлені з ніржавіючої сталі зі

срібним покриттям. Виводи з неіржавіючої сталі були покриті міддю, щоб зменшити втрати ВЧ потужності, і карбідом титану товщиною близько 20 мкм. Антени захищені вуглецевими лімітерами [22-24].

Система ІЦР на частоті 25 МГц застосовується на установці JET [25]. Причому вона ж використовується і для очищення стінок камери [26]. Антенна система JET [27] є фазованими ґратами з чотирьох полоїдальних смуг (напіввитків). Управління фазою між смугами дозволяє збуджувати хвилі з різними спектрами $k_{\parallel}$. Зазвичай, використовується фазировка між сусідніми смугами антени - це π (дипольная фазировка) або $\pm\pi/2$. Частини антени, звернені до плазми, закриті екраном Фарадея, утвореним похилими стрижнями. Кожна антена оточена двома полоїдальним екранами, виконаними з плиток Be [28], і вертикальною перегородкою з Be, встановленою в центрі (між смугами 2 і 3) кожної антени. В експериментах, зазвичай, смуги 1 і 2 антен A_2 , A і B живляться одними і тими ж ВЧ-підсилювачами через 3 Дб гібридну систему зв'язку [29]. Смуги 3 і 4 антени A живляться незалежними підсилювачами.

Система ІЦР нагріву використовувалася також на стеллараторі Large Helical Device (LHD) [30], а у надпровідному токамаці HT-7U системи ІЦ нагріву (ICRH) повинні забезпечувати роботу в безперервному режимі [31, 32].

Найбільший і найпотужніший ВЧ пристрій планується для токамака ITER. Для цього проекту потрібно 8 генераторів, потужністю по 2,5 МВт кожен. Це реалізується за допомогою двох ламп-тетродів EIMAC 4cm2500, включених паралельно в кожному генераторі-джерелі ВЧ потужності [33]. Сумарна ВЧ потужність планується на рівні 20 МВт в діапазоні частот 35-65 МГц [34,35]. При повністю узгодженому навантаженні всі 8 джерел-генераторів можуть забезпечити 40 МВт ВЧ енергії.

Для проведення досліджень з ІЦР нагрівання на корейській установці KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) встановлені 4 ВЧ генератора по 2 МВт, що працюють в діапазоні частот від 25 до 60 МГц.

Першим каскадом генератора KSTAR є модифікований FMIT (Fusion Material Irradiation Test) генератор, що складається з 4-х каскадного підсилювача. Для кінцевого підсилювача була спеціально розроблена лампа-тетрод 4CM2500KG. Була отримана ВЧ потужність в 1,9 МВт протягом 300 с на частоті 33 МГц. Електрична ефективність кінцевого підсилювача для останнього варіанту лампи склала близько 70%. Це був дуже обнадійливий результат для розробки ВЧ генератора ICRF для ITER, однак, для забезпечення надійної роботи ВЧ пристроїв системи ICRF на KSTAR, FAST і ITER, потрібні були ще великі зусилля [36,37,38].

В якості системи додаткового нагріву для стаціонарного надпровідного токамака-1 (SST-1) розроблена система ІЦРН потужністю 1,5 МВт. Були обрані дві частоти в діапазоні між 20 МГц і 91,2 МГц, щоб забезпечити і нагрів при тороїдальних магнітних полях 1,5 і 3,0 Тл. Причому, генератор, що задає, працює в безперервному режимі, тривалість вихідного сигналу генерації ВЧ енергії регулюється схемою управління ВЧ перемикачем. Вихідний каскад підсилювача потужності живиться напругою 12 кВ і споживає максимальний струм 30 А. Вихідний сигнал знімається через петлю зв'язку, яка забезпечує передачу необхідної ВЧ потужності і гальванічну розв'язку навантаження від анодної напруги. Величина опору навантаження трансформується через коефіцієнт магнітного зв'язку M [39].

1.3 ВЧ методи у сучасних стелараторах

У 2022 р. відновить свою роботу найбільший стеларатор Венделстайн-7х. На ньому буде встановлено нове обладнання, серед якого комплекс для іонно-циклотронного нагрівання плазми. Це відкриває нові можливості для проведення експериментальних досліджень. Основним методом нагрівання є мікрохвильове нагрівання на 2-й гармоніці ЕЦР. У зв'язку з тим, що зона ЦР має бути присутня у плазмовому шнурі, діапазон робочих магнітних полів досить вузький і розташований біля значення 2,5 Тл. Існує принципова

можливість реалізовувати нагрівання на 3-й гармоніці ЕЦР в магнітному полі 1,7 Тл. Стеларатор Wendelstein 7-X (середній малий і великий радіус $a=0.55$ м і $R_0=5.5$ м) з надпровідними котушками, збудований в Грайфсвальді (Німеччина), є першим «повністю оптимізованим» стеларатором [40,41]. Це найбільший пристрій цього класу в світі. Wendelstein 7-X призначений для експериментів з тривалістю імпульсів 30 хвилин при потужності електронного циклотронного резонансного нагрівання (ЕЦРН, ECRH) на частоті 140 ГГц в якості основної системи нагріву з потужністю до 5-і 10 МВт після модернізації. Таку потужність забезпечать 6-10 гіротронів відповідно. Планується і іонно-циклотронне резонансне (ІЦР) нагрівання (ICRH) в режимі більш короткого імпульсу тривалістю (до 10 с). Через складнощі з установкою конденсаторів, що узгоджують, поблизу антени одна ІЦР антена працюватиме на частотах 25-38 МГц, а друга—76 МГц [42]. Необхідно зазначити, що обладнання для ВЧ нагріву допускає перебудову частоти у досить широкому діапазоні 25-40 МГц, що забезпечує реалізацію умов іонно-циклотронного резонансу для іонів водню у плазмовому шнурі, як для магнітного поля 2,5 Тл, так і 1,7 Тл.

Наявність обладнання для ВЧ нагрівання дає можливість здійснювати очистку внутрішніх вакуумних поверхонь установки за допомогою ВЧ розряду у водні або в інших хімічно активних газах. ВЧ водневе очищення, спрямована на отримання атомів водню, практикувалося на багатьох термоядерних пристроях з насправді позитивними результатами [43,44]. Таке очищення є особливо ефективним для видалення вуглеводнів та відновлення оксидних шарів, які адсорбуються у вакуумній камері. Застосування такого очищення стінок у стелараторі Венделстайні-7екс спрямоване на підвищення продуктивності потужних розрядів та розширенню можливостей для роботи. Очищення стінок у водні залежить від створення іонів водню та атомів у плазмі, які можуть хімічно взаємодіяти з домішками, адсорбованими на стінці. Протягом звичайних робочих циклів, за наявності магнітного поля, цей метод можна застосовувати за допомогою ВЧ-розряд, де очікується, що

атоми відіграватимуть головну роль у взаємодії на поверхнях, недоступних для іонів плазми.

Розряди генерують атоми водню з низькою енергією, які не сприяють великому навантаженню стінок. Для ефективного отримання атомарних водневих нейтралів H_0 необхідна плазма з доволі великою густиною. Однак, для того, щоб десорбовані домішки були відкачані, проте не іонізовані, густина плазми повинна бути низькою. Щоб рівень генерації атомів водню був високим, тиск нейтрального газу повинен бути максимально високим. У розряді ЕЦРН нижня межа густини плазми визначається за допомогою проникнення ЕЦРН. Верхній рівень тиску задається умовами пробою. Оскільки плазма має високу густину, ймовірність іонізації домішок, десорбованих зі стінки, не мала для електронно-циклотронного (ЕЦ) очищення стінок вакуумної камери. Рішенням може бути періодичний імпульсний розряд, який дає певні періоди паузи для відкачки дегазованих домішок [45]. Такий розряд практикується на W7-X (ланцюг імпульсів для очищення дивертора), проте імпульси є довгими у порівнянні з часом створення плазми, і плазма є гарячою та повністю іонізованою.

Числові експерименти [46] показали, що у стеллаторі Венделстайн-7екс розряд має тенденцію до створення густої плазми з низькою температурою електронів. Під час створення температура плазми падає, швидкість генерації атомарного водню зменшується. Основна частина потужності йде на нееластичні зіткнення, які створюють коливальний і обертальний збуджені стани молекул, що не сприяє дисоціації та створенню атомарного водню. Цього можна уникнути за рахунок збільшення вхідної потужності, проте дисбаланс густини плазми призведе до швидкого підвищення густини. З цієї причини розряд повинен бути імпульсним. У проміжках часу між імпульсами зниження густини плазми забезпечується дисоціативною рекомбінацією молекулярних іонів. У цьому процесі також утворюється атомарний водень.

Першою проблемою, що виникає при роботі при низькому магнітному полі, є створення плазми. Можна створити плазму за допомогою інжекції швидких нейтральних атомів, яка є на Венделстайні-7екс. Однак, як показують розрахунки [46], між стартом пучка нейтральної інжекції і досягненням повної іонізації нейтрального газу проходить близько 5 с. Це означає, що протягом цього часу практично вся енергія інжекції доставляється в приймач нейтрального пучка. Але його конструкція не дозволяє цього. У цій ситуації єдиною можливістю створення плазми залишається імпульс ВЧ нагріву. Розрахунки говорять про те, що для успішного створення плазми за час менший за 0,5 с перед включенням інжекції швидких нейтральних атомів необхідно мати попередню плазму з густиною близько 10^{10} – 10^{11} см⁻³. Тобто мінімальною задачею ВЧ нагріву є створення такої плазми.

В трьохзахідному стелараторі «Ураган-3М» (У-3М), з природною гвинтовою диверторною конфігурацією, воднева плазма створюється та нагрівається ВЧ-полями в області альфвенівських частот $\omega \lesssim \omega_{ci}$, де ω – частота генератора, ω_{ci} – циклотронна частота іонів. Для запалювання ВЧ-розряду та доведення лінійно-усередненої густини електронів (середньої густини) $\bar{n}_e$ до одиниць 10^{12} см⁻³ використовується неекранована рамкова антена (РА) з широким спектром поздовжніх (по відношенню до утримуючого магнітного поля) довжин хвиль $\lambda_{\parallel}$ і великими поздовжніми електричними струмами [47]. За порядком величини електронна температура цієї плазми T_e може знаходитися в межах десятків–сотен ЕВ в залежності від ВЧ-потужності РК1, що підводиться до антени, і густини $\bar{n}_e$. В режимі, де $\bar{n}_e \sim (1-3) \times 10^{12}$ см⁻³, $T_e \gtrsim 100$ эВ, плазма в Ураган-3М є слабозіткненою і її дослідження являє самостійний інтерес з точки зору моделювання фізичних процесів у великих термоядерних установках (див., наприклад, [48]).

Докладні дослідження характеристик ВЧ-розряду, що створюється РА, при різних значеннях потужності P_{KI} та початкового тиску робочого газу-водня p , описані в роботі [49].

1.4. ВЧ джерела електромагнітних полів

Система ВЧ нагріву плазми казахського матеріалознавчого токамака - КТМ побудована з використанням автогенератора зі складним розподільним ВЧ ланцюгом. Тут застосовується такий же підхід у створенні ВЧ комплексів для ІЩ нагрівання плазми, як і на стелараторах Ураган, що полягає у створенні однокаскадних двотактних автоколивальних систем на основі ВЧ потужних генераторних тріодів. Принциповою особливістю таких систем є використання того, що антена і внесений плазмою імпеданс є складовою частиною складного розподіленого коливального контуру, самозбудження коливань в якому відбувається на одній зі своїх резонансних частот цього ланцюга. Достатньою і необхідною умовою виникнення стабільної генерації ВЧ коливань є забезпечення наявності в смузі позитивного зворотного зв'язку хоча б одного резонансу з добротністю порядку $>10\div15$. У цьому разі система буде працездатна у всьому діапазоні плазмових навантажень r_{ant} аж до режиму холостого ходу, тобто без плазми. До складу ВЧ-комплексу КТМ входять: компактна модульна резонансна антена, коаксіальні фідери, ВЧ генератор, джерело високовольтного анодного живлення, система діагностики і управління. Автогенератор виконаний на двох потужних тріодах (ГУ-88А) за двотактною схемою із загальним катодом. Передбачена можливість регулювання частоти коливань. Система ВЧ живлення складається з чотирьох ВЧ модулів з симетричним виходом, кожен з яких працює на свою антену, підключену через коаксіальний фідер. Основні параметри одного ВЧ модуля: робоча частота— $13,0\pm0,5$ МГц, номінальна вихідна потужність—2 МВт, максимальна тривалість імпульсу—5 с, мінімальний період проходження імпульсів—900 с, максимальна напруга на

кожному плечі антени-25-30 кВ, хвильовий опір антенного контуру—25 Ом. Анодний контур генератора складається з ємностей і індуктивностей монтажу, роз'ємів і кабелів. За допомогою напівхвильової лінії забезпечуються протифазні коливання в різних плечах автогенератора. ВЧ потужність від анодного контуру через вісім радіочастотних кабелів подається в навантаження (антени). Навантаженням ВЧ генератора є система з антени і створюваної плазми. Це система з розподіленими параметрами, однак, поблизу робочої частоти, вона може розглядатися як зосереджена індуктивність. До виникнення плазми активний опір навантаження складає долі ома і утворюється за рахунок омичних втрат в антені, камері, ланцюгах, що підводять ВЧ енергії. Після виникнення він збільшується до одиниць Ом за рахунок внесеного опору плазмою в антенний контур [50,51].

У токамаці JET також застосовується багатокаскадна схема побудови ВЧ генератора. Підсилювачі потужності в першому варіанті були зібрані на 1,5 МВт тетродах Еімас 8973. Потім вони були переобладнані на установку 2MW Томпсон TH525 тетродів. Діапазон частот від 23 до 57 МГц. В кінцевому варіанті два підсилювача потужності (по 2 МВт кожен) об'єднувалися в один бокс і два таких бокса живили одну антену сумарною потужністю, що генерується до 8 МВт [29].

1.5 Управління потоками електронів-утікачів (ЕУ)

Електрони-утікачі вивчалися на багатьох установках в світі, на ранніх токамаках [52]. І на останніх більших машинах, таких як JET [53-56], JT-60U [57,58], Tore Supra [59, -60], TEXTOR [61,62], DIII-D [63-65], FTU [66], TFTR [67]. У роботах [68,69] було продемонстровано, що швидкість генерації втікаючих електронів тим більше, чим більше розмір машини.

Існує ряд способів придушення ЕУ, які досліджуються в усьому світі, основні з них - це резонансні магнітні збурення [62], також інжекція важких газів [70-74] і інжекція пелет [72]. Через відмінності в генеруванні надійних і

відтворюваних пучків втікаючих електронів, було зроблено лише кілька спроб придушити повністю такий пучок ЕУ [59-65] з частковим успіхом.

Проблема утікаючих електронів дуже важлива. Наприклад, у токамаках при зривах розрядів, а в стелараторах при вмиканні та вимиканні тороїдального магнітного поля, утворюються потужні потоки електронів на стінку вакуумної камери і все діагностичне обладнання, розміщене всередині її. Такі потоки призводять до серйозних теплових і механічних навантажень. У сучасних установках енергія таких потоків ЕУ може складати близько $n \cdot 10$ МЕВ. Щодо придушення ЕУ. Відомо, наприклад, що магнітні флуктуації можуть запобігти значному струму ЕУ. Тому, як генерацію ЕУ визначають різні фактори, основні з них, такі як, наприклад, електричне і магнітне поле. Як повідомлялося раніше з JET [75,76], генерація ЕУ відбувається тільки вище порогового значення для тороїдального магнітного поля близько 2Т. Такий же поріг існує і в Tor Supra [68] і в TEXTOR. Отже, він не залежить від розміру машини. Більш того, ймовірність виникнення ЕУ значно зростає для магнітних полів за межами 3 Т з тенденцією до підвищення струмів ЕУ [77].

У механізмі генерації ЕУ в ІТЕР переважає лавинне розмноження. Таким чином, метод пом'якшення повинен забезпечити надійне придушення цього механізму. В даний час, як метод для пом'якшення механічних і теплових навантажень, застосовується імпульсне закачування газу. Воно ж використовується для придушення генерації ЕУ [78-83]. Придушення генерації утікання шляхом масивного закачування газу вимагає величезної кількості газу, яка повинна бути введена в вакуумну камеру. Мета полягає в тому, щоб збільшити критичне поле для генерації утікання $E_c \approx 10^{21} \cdot n_e$ до значень, таких, що $E < E_c$ під час поточного гасіння. Тут густина n_e являє собою суму зв'язаних і вільних електронів в m^{-3} . Максимальне електричне поле в JET і Текстор становить близько 50 В/м і таке ж значення передбачається для ІТЕР [69]. Таким чином, для придушення утікання повинна бути досягнута густина $n_e > 5 \cdot 10^{22} m^{-3}$. Тут потрібно мати на увазі, що

це електричне поле E є середнім значенням. Радіальний пік може зажадати більш високу густину.

У сучасних пристроях необхідні густини електронів для лавинного придушення ще не досягнуті. Максимально досягнута густина електронів в Текстор з використанням спеціального клапана [84], становить близько $n_e = 8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Цей тип клапана був недавно встановлений в JET і здатний вводити до $6 \cdot 10^{23}$ частинок. Якщо прийняти такий же коефіцієнт змішування, як і в TEXTORi, то це призведе до електронної щільності $n_e = 2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Щодо Резонансних магнітних збурень (RMP). Магнітні збурення викликають підсилення радіальної втрати ЕУ [85] і можуть використовуватися для придушення ЕУ. Можливість придушити ЕУ при використанні зовнішніх котушок показана на JT-60 [86]. Ці експерименти показали, що потоки ЕУ відсутні для досить високого збурення поля з номером базової моди $m/n=3/2$. Вплив резонансного магнітного збурення при генерації електронів втікачів також вивчався на TEXTOR. За допомогою RMP можна придушити тільки лавинну генерацію ЕУ. Швидкість генерації для механізму Дрейсера експоненціально зростає зі зростанням електричного поля і не може бути компенсована за допомогою RMP, викликаними втратами. Підсилення дифузії теплових частинок під час RMP зв'язані з дифузією уздовж лінії радіального поля, яка описується коефіцієнтом дифузії поля $D_{\parallel}$ [87-88].

Таким чином, високоенергетичні потоки електронів-утікачів є найнебезпечнішим наслідком розвитку нестійкості пробою в тороїдальних установках. При взаємодії з елементами конструкції такі частинки можуть викликати пошкодження і руйнування. Існуючі методи боротьби з потоками ЕУ поки що не дають повного ефекту.

Висновки до розділу 1

Підводячи підсумок вищевикладеного матеріалу, можна зробити висновок, що на сьогоднішній день жодна з великих і середніх установок з

вивчення фізики плазми не обходиться без ВЧ пристроїв. Основне завдання таких пристроїв-це нагрівання плазми. Причому, нагрівання плазми, що досягається за допомогою генерації ВЧ полів здійснюється як в області іонно-циклотронного, так і в області електронно-циклотронного резонансу. Відповідно, діапазон частот, в яких створюються електромагнітні ВЧ поля дуже широкий від одиниць МГц до сотень ГГц. Потужність ВЧ джерел становить від сотень кВт до декількох одиниць МВт.

При нагріванні плазми ВЧ полями навантаженням ВЧ джерела є вже створена плазма. У разі ж, коли плазма і створюється і нагрівається за допомогою ВЧ полів, навантаження ВЧ джерела змінюється в широких межах (до часток Ома). Тому, що в процесі створення плазми, її густина може збільшуватися від рівня природної іонізації до рівня повної іонізації робочого газу, у нашому випадку-водня. Ця обставина визначається впливом плазми на ВЧ антену, оскільки антена зв'язує джерело ВЧ енергії з навантаженням, і її конструкція визначає взаємний вплив ВЧ енергії, що випромінюється та параметрів плазми-навантаження. Оскільки, в основному ВЧ джерела в сучасних установках працюють на фіксованих частотах і на, практично, фіксоване навантаження, тому вивченню впливу плазми на ВЧ тракт приділялося мало уваги. В основному визначався опір навантаження ВЧ тракту в режимі нагрівання плазми.

Ще одним напрямком використання ВЧ полів в термоядерних установках із замкненою пасткою є очищення внутрішніх поверхонь вакуумної камери. Найбільш перспективним для цього вважається діапазон ВЧ полів іонно-циклотронного резонансу. Але останнім часом з'явилися хороші результати при використанні УКХ безперервних розрядів як з накладенням магнітного поля, так і без нього.

Проблема придушення електронів утікачів (ЕУ) дуже актуальна, тому що енергія потоків таких частинок така, що може привести до руйнування вакуумної камери. Існуючі на сьогодні способи придушення потоків таких

електронів поки повністю не можуть задовольнити вчених. Тому роботи в цьому напрямку знаходяться серед пріоритетів на всіх установах.

Дана дисертаційна робота присвячується вирішенню перерахованих вище і інших, пов'язаних з ними, ще не вирішених завдань.

РОЗДІЛ 2

ВЗАЄМОДІЯ ПЛАЗМИ З ВЧ АНТЕНОЮ ТА ДЖЕРЕЛОМ ВЧ ПОЛЯ

2.1 Вплив плазмового навантаження на радіотехнічні характеристики ВЧ системи у стелараторі Ураган 2-М

Плазма-це квазінейтальний газ із заряджених частинок. В найбільш поширеному варіанті плазма складається з електронів і позитивних іонів. Також в плазмі можуть бути присутніми і нейтральні атоми. Якщо доля цих частинок зневажливо мала, то в цьому випадку плазма вважається повністю іонізованою [89]. Таким чином, основний фізичний процес створення плазми-це процес іонізації нейтральних частинок електронним ударом. У стелараторах Ураган-2М і Ураган-3М створення і нагрівання плазми здійснюється за допомогою ВЧ потужності. Визначаючи задачу створення плазми для цих установок, можна зупинитися на такому формулюванні: як завдання ВЧ нагріву плазми з низькою густиною та електронною температурою. Причому, в процесі створення плазми, її густина може збільшуватися від рівня природної іонізації до рівня повної іонізації робочого газу, у нашому випадку-водню.

Антенa зв'язує джерело ВЧ енергії з навантаженням, і її конструкція визначає взаємний вплив випромінюваної ВЧ енергії та параметрів плазми - навантаження. Для того, щоб визначитися з характеристиками антени та її конструкцією, необхідно провести якісний аналіз процесу створення плазми. Оптимальним підходом до такого аналізу є варіант оснований на проведенні аналізу електричних ланцюгів ВЧ енергії в підключену антену.

Для установок, де використовується ВЧ метод створення та / або нагріву плазми особливо важливою задачею є дослідження механізмів поглинання плазми ВЧ потужності. На сьогоднішній день вже накопичений досить великий експериментальний матеріал [90,91] (оскільки ВЧ розряд відомий вже більше ста років [92]) з вивчення ВЧ розряду, розроблені теоретичні

моделі [93-95], що описують фізику введення ВЧ потужностей в плазму. Однак, у всіх перелічених вище роботах не враховуються втрати ВЧ потужностей, безпосередньо не пов'язаних з плазмою, наприклад, це втрати в зовнішніх ділянках передачі ВЧ енергії від генератора в плазму. А при сучасних високих рівнях генерованої ВЧ потужності ці втрати можуть бути досить значними.

ВЧ потужність, яку віддає генератор, проходить по лінії передачі в узгоджувач, в антену і в плазму-навантаження. На кожному етапі проходження ВЧ енергії відбувається втрата частини потужності. І тому, для передачі максимальної потужності від джерела в навантаження, необхідно забезпечити узгодження опорів. Згідно, переважаючій нині, трансформаторній моделі ВЧ індуктивного розряду [96,97] показано, що ВЧ потужність, яка віддається генератором в лінію передачі не дорівнює потужності, введеній в плазму. А потужність, яка виділяється в антені, не дорівнює потужності введеній в плазму, оскільки згідно з формулою $P_{\text{ген}} = P_{\text{ант}} + P_{\text{пл}}$, ВЧ потужність від генератора $P_{\text{ген}}$ розділяється на потужність, яка виділяється в антені $P_{\text{ант}}$ і в плазмі $P_{\text{пл}}$. За умови повного узгодження ВЧ тракту, потужність, яка виділяється в антені, розподіляється на дві частини: на нагрівання власно антени, підвісних мереж, а також елементів вакуумної установки камери, що знаходяться поблизу антени та на плазму. Для пристроїв, призначених для створення і нагрівання плазми, прийнятним буде виконання умов, коли в ВЧ плазму вводиться більше енергії, ніж виділяється на антенні, тобто $P_{\text{ген}} = P_{\text{пл}} >> P_{\text{ант}}$. В роботі [97] було введено поняття еквівалентного опору плазми R_e , сенс якого полягає в кількісному визначенні здатності плазми поглинати ВЧ енергію. Вважається, що його величина визначається основними властивостями індуктивного розряду. Тож вона залежить від законів проникнення полів у плазму і від механізму поглинання плазмою ВЧ потужності.

Умови найкращого узгодження ВЧ генератора з плазмою залежать як від властивостей самої плазми-від концентрації електронів, іонів, так і від

зовнішніх умов: тиску нейтрального газу, величини зовнішнього магнітного поля, розмірів і форм антен, як джерела плазми [98]. Так само в цій роботі показано, що зі збільшенням густини плазми, зі зростанням концентрації електронів максимум величини еквівалентного опору плазми $R_{пл}$ зсувається в сторону високих магнітних полів. З цього випливає, що при фіксованій величині магнітного поля, в області високих концентрацій електронів, величина $R_{пл}$ знижується з ростом густини плазми. Це зниження величини еквівалентного опору плазми є причиною насичення густини плазми при збільшенні потужності ВЧ генератора [99-101] відповідно, настає момент, коли значення $R_{пл}$ зменшується настільки, що ВЧ потужність не надходить до плазми і відбувається зрив розряду. До зриву розряду призводить зниження ВЧ потужності, яка вводиться в плазму, що виникає при неузгодженості ВЧ генератора з навантаженням-плазмою зі зміною величини опору навантаження - плазми, як активної його складової, так і реактивної [98,99].

З урахуванням викладеного, можна провести аналіз процесу створення плазми. Для аналізу пропонується еквівалентна схема живлення антени з послідовним опором r_a , внесеним плазмою в антену (рис. 2.1) Паралельно ланцюгу антена - навантаження (внесений опір) включений конденсатор антенного контуру C_a . Ці три елементи утворюють паралельний коливальний контур, який настраюється на частоту ВЧ коливань, що надходять від ВЧ генератора в антену, тобто на частоту нагрівання.

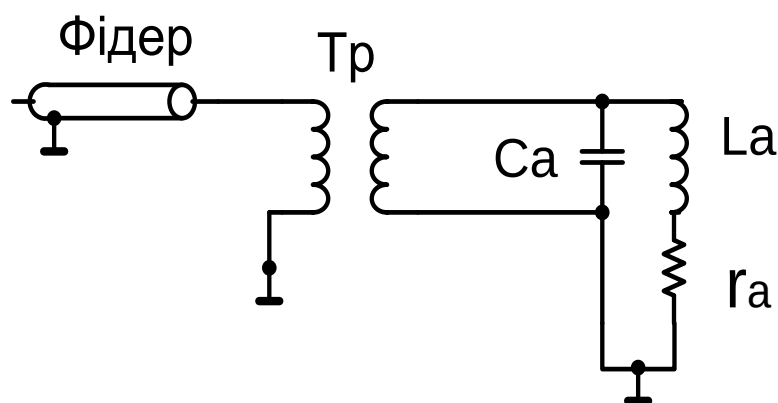


Рис. 2.1 Електрична схема узгодження антени і фідера

В умовах резонансу $f = 1 / (2\pi \sqrt{L_a \cdot C_a})$, еквівалентний опір контура стає чисто активним $R_k = L_a / R_a \cdot C_a$, і він підключений до вторинної піднімаючої обмотки трансформатора. через свій коефіцієнт трансформації $k_{тр}$, перетворює опір антенного контура R_k до величини опору на вході трансформатора $R_{вх} = R_k / k_{тр}^2$. Опір на вході трансформатора $R_{вх}$ дорівнює хвильовому опору джерела передачі ВЧ енергії від генератора до антени R_f . Отримуємо співвідношення $R_k = R_f \cdot k_{тр}^2$. Для установок Ураган-2М і Ураган-3М хвильовий опір фідерної лінії передачі може складати 25 Ом чи 50 Ом для одного плеча. Тоді значення опору, що вноситься, необхідного для повного узгодження, складе $R_k = 50 \cdot k_{тр}^2$. При дотриманні цієї умови виконується узгодження ВЧ тракту від лінії передачі до навантаження-плазми. Якщо величина R_k змінюється, (а вона може змінюватися, якщо зміниться внесений плазмовий опір R_a), тобто порушується рівність $R_a = R_{a0}$, де R_{a0} -розрахована величина для умови повного узгодження ВЧ тракту. Волновий опір фідерної лінії передачі, індуктивність антени L_a , конденсатор антенного контура C_a і коефіцієнт трансформації $k_{тр}$ у нас постійні і визначаються конструктивними особливостями, тоді в фідерній лінії передачі виникає відбита хвиля ВЧ енергії зі струмом $I = I_1 \cdot (1 - \rho) / (1 + \rho)$, де $\rho = R_{a0} / R_a$, I_1 - величина струму падаючої хвилі. При цьому потужність, що передана до навантаження, зменшується і становить $P = P_1 \cdot 4 \rho / (1 + \rho)^2$, де P_1 -потужність падаючої хвилі в лінії передачі [102]. Все це є доказом того, що знання про внесений опір плазмою в антену мають величезну важливість для розуміння процесу введення ВЧ потужності в плазму. На стелараторі Ураган-2М були проведені експерименти щодо вивчення впливу плазми на параметри ВЧ узгоджувачів пристроїв. Була проведена якісна оцінка впливу плазми, що створюється та утримується в установці на зміни добротності коливального контуру. В якості досліджуваної антени на Урагані-2М була вибрана рамочна антена з широким спектром довгоядних, тобто спрямованих вздовж магнітного поля, мод.

2.2 Оцінка ступеня взаємодії антени з плазмою

На установці Ураган-2М, для узгодження антен з ВЧ трактом, використовуються узгоджувачі пристрої, виконані на основі одного паралельного коливального контура [103]. Індуктивністю L в такому контурі є антена (рис.2.2), паралельно якій підключено додатковий конденсатор антенного контуру C . Контур настраюється на резонансну частоту генератора ω_0 або близьку до неї. Критерієм правильної настройки антенного контуру є параметри отриманої плазми. Навантаженням контура (антени) є плазма-її опір R , внесений в контур за допомогою взаємодії плазми з антеною (рис. 2.2). На рисунку не показано активний опір самої антени, тобто опір втрат.

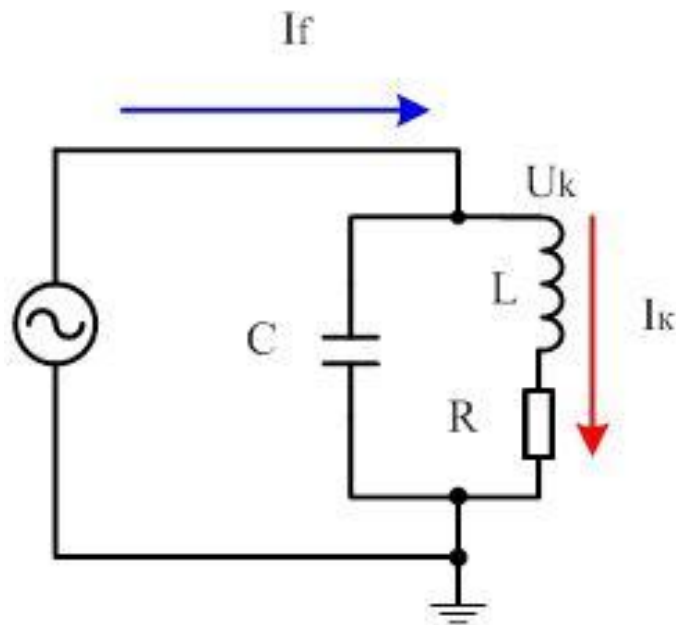


Рис. 2.2 Схематичне зображення антенного контуру при навантаженні

Як відомо, коливальний контур (рис.2.2) характеризується добротністю $Q = \frac{\rho}{R}$, де R -опір втрат в контурі, де ρ -хвильовий опір контура, який визначається зі співвідношення $\rho = (L/C)^{1/2}$, L і C -відповідно

індуктивність і ємність коливального контуру. Опір втрат (навантаження) R , у свою чергу, складається з активного опору самої антени (опір її конструктивних елементів) і з'єднувальних ланцюгів та опору навантаження r_L . У нашому випадку навантаженням антени є плазма і r_L -це внесений плазмовий опір в антенний контур, тобто $R=r_{ant}+r_L$. З формули для добротності випливає, що зі збільшенням навантаження коливального контуру (тобто величини R ,) зменшується його добротність. Якщо вважати, що активний опір антени при імпульсі не змінюється, то, в такому випадку, зміни добротності контура визначаються опором плазми, внесеним в антену- $Q=\rho/(r_{ant}+r_L)$. Таким чином, зі зміною добротності можна зробити висновок про зміни опору навантаження антенного контуру, тобто про опір, внесений плазмою в антенний контур. Цей опір залежить від багатьох параметрів, але в основному від відстані між випромінюючою поверхнею антени і плазмою, від температури і густини плазми, а також деяких інших [104].

Для визначення добротності антенного контуру було запропоновано наступну методику. При резонансі опір паралельного коливального контура має активний характер. Струм в контурі дорівнює $I_k=U_k/\rho$, де U_k -напруга на контурі, I_k -струм, що підводиться до контуру (струм живлення), або струм в живильному ланцюгу (тобто основна гармоніка анодного струму лампи генератора) $I_f=U_k/(\rho \cdot Q)$. Звідси отримуємо співвідношення $Q=I_k/I_f$ [105]. Проводячи вимірювання відповідних струмів, з їх співвідношення ми можемо визначити шукану величину- Q . Але за умови, що генератор не змінює значно свою частоту при роботі (в цьому випадку зміниться величина ρ). Було помічено, що частота джерела Каскад-1 (2) при тривалій роботі змінює частоту генерації за рахунок нагрівання частотозадаючих елементів. Були проведені вимірювання нестабільності частот Каскада-1 в режимі очищення вакуумної камери коли навантаження на ВЧ антену мале і, відповідно, струм в контурі генератора малий, тривалість імпульсу-60 мс при паузі між посиленнями 10 с, а також при імпульсному режимі роботи коли ток в контурі генератора значно вищий, тривалість імпульсу-20 мс при паузі

між імпульсами 10 с. Зміни частот зафіксовані за 150 хвилин роботи і при напругах на аноді 5 і 9 кВ відповідно. Ці зміни склали 63 кГц і 35 кГц, в першому і другому режимі відповідно, при початковій частоті генерації $f_0=8640$ кГц. Тобто, ці зміни склали менш одного відсотка і їхнім впливом на величину добротності антенного контуру можна знехтувати. Відповідно до даної методики була проведена якісна оцінка добротності (внесеного плазмою опору в антенний контур) рамочної антени в режимі очищення вакуумної камери стеларатора Ураган-2М. Для цього реєструвалися наступні параметри ВЧ системи: струм, підведений до антенного контуру (струм фідера)- I_f , струм у самому контурі (струм антени)- I_k , і також-напруга на коливальному контурі- U_k .

На рис. 2.3 представлений графік відношення ставлення $I_k/I_f=Q$ від магнітного поля. На ньому добре видно, що в діапазоні значень магнітного поля практично до 0,05 Тл існує, так зване, плато. Тут величина добротності антенного контуру змінюється незначно і має мінімальне значення (близько 15).

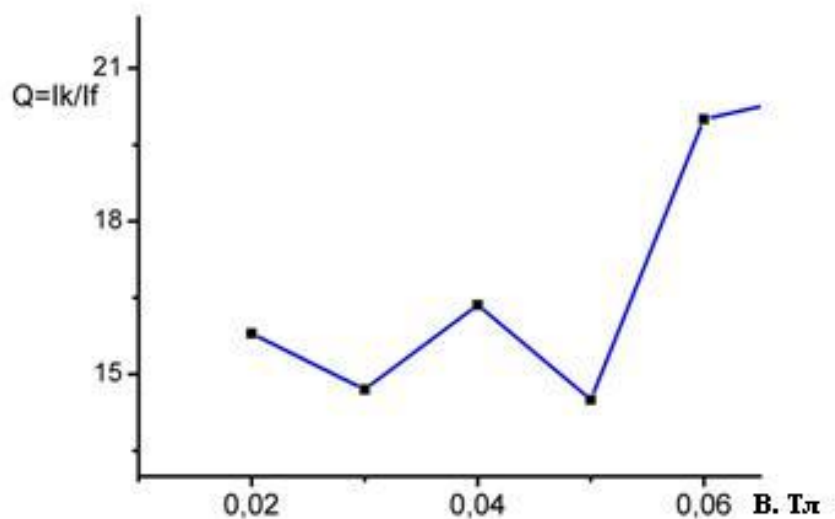


Рис. 2.3 Залежність $Q=I_k/I_f$ від величини магнітного поля [106]

Зростання добротності починається при перевищенні величини магнітного поля значення 0,05 Тл. При таких величинах магнітного поля відбувається зниження навантаження, що вноситься плазмою в антенний контур.

На наступному етапі була проведена оцінка навантаження антенного контура вже при роботі ВЧ джерела (антени) на створювану плазму (рис. 2.4).

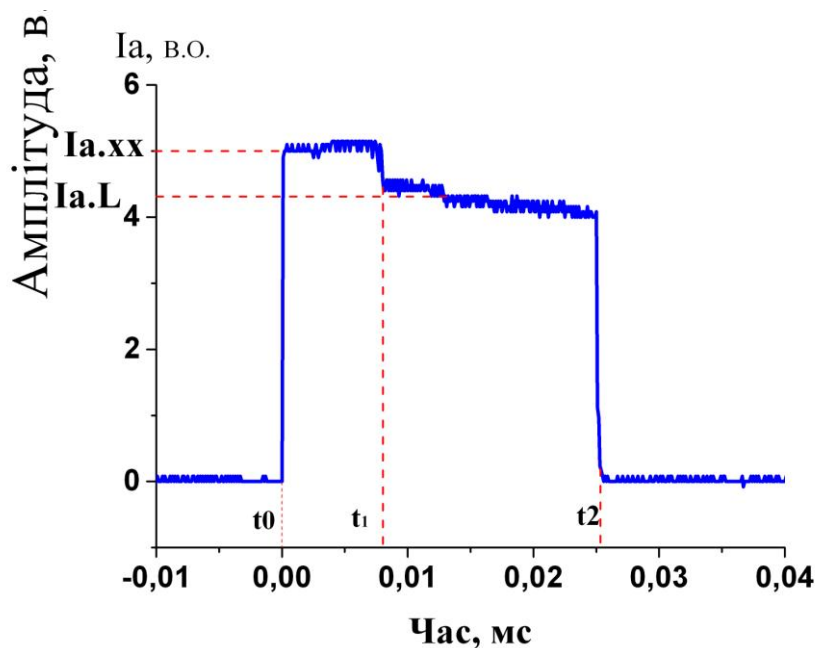


Рис. 2.4 Принцип визначення опору ВЧ контуру при його навантаженні-при створенні плазми [106]

Проводились вимірювання ВЧ струму в контурі антени $I_{a.xx}$ в момент часу t_0 - t_1 . У цьому проміжку часу плазми ще не існує, розряд відсутній - $I_{a.xx}$ (так званий режим холостого ходу). Такий самий струм є в антені, але вже в режимі завантаження антени плазмою $I_{a.L}$, в момент коли плазма існує і змінився внесений опір навантаження антенного контуру (t_1 - t_2) (рис. 2.4). В режимі холостого ходу опір навантаження (втрат) в контурі визначається, здебільшого, активним опором самої антени $R=r_a$, при створенні плазми до нього додається опір навантаження антени $R=r_a+r_L$.

Оскільки струм в антені в режимі холостого ходу дорівнює $I_{axx} = U_k / \sqrt{\rho + r_{ant}}$, а при навантаженні - $I_{aL} = U_k / \sqrt{\rho + r_{ant} + r_L}$, то відношення цих струмів визначається формулою $\frac{I_{axx}}{I_{aL}} = \frac{\sqrt{\rho + r_{ant} + r_L}}{\sqrt{\rho + r_{ant}}} = 1 + \frac{r_L}{\rho + r_{ant}}$, який дозволяє зробити висновок про зміну величини опору навантаження антени та обсягу ВЧ потужності, що випромінюється антеною.

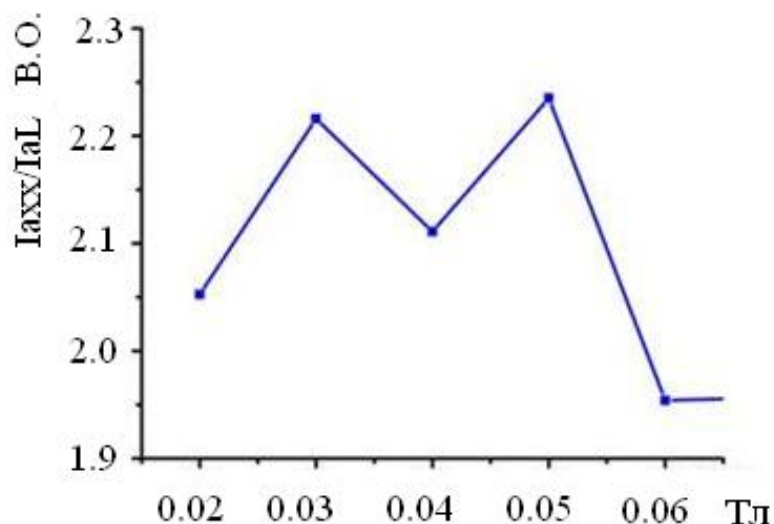


Рис. 2.5 Залежність I_{axx}/I_{aL} (навантаження) від величини магнітного поля [107]

На рис. 2.5 представлений графік залежностей відношення I_{axx}/I_{aL} від магнітного поля в режимі очищення. Чим більше співвідношення цих струмів, тим вище внесений опір плазмою в контур антени. Цей графік показує зону з підвищеною завантаженістю антени в діапазоні магнітних полів від 0,03 до 0,055 Тл. І зону зменшення опору навантаження антени при підвищенні поля понад 0,05 Тл. З досягнутим мінімумом при $B=0,07$ Тл. Що практично відповідає попереднім вимірам добротності антенного контуру Q (рис. 2.3).

На рис. 2.6 приведена зміна навантаження антенного контуру (відношення $I_{a,xx}/I_{a,L}$) від тиску робочого газу при фіксованому значенні магнітного поля $B=0,07$ Тл. При цій величині магнітного поля була виміряна залежність $I_{a,xx}/I_{a,L}$ від тиску робочого газу (гелій).

Виявлено діапазон тисків $4,25 \cdot 10^{-3} \div 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па, в якому зміни співвідношення струмів мінімальні (близько 10%) і мало змінюються. При підвищенні тиску відбувається збільшення навантаження антенного контуру. Це інтерпретується як зменшення добротності антенного контуру, що відповідає підвищенню введеної в плазму ВЧ потужності.

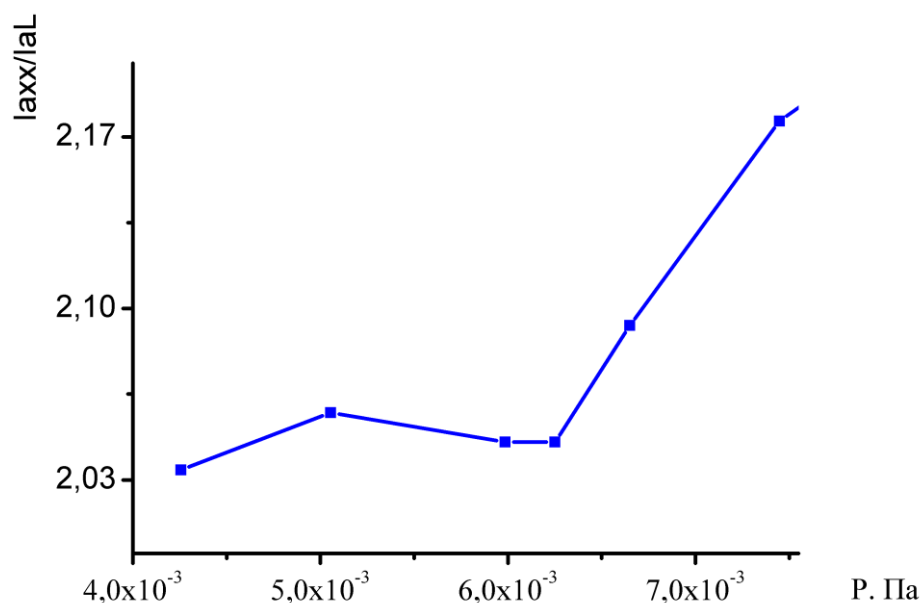


Рис. 2.6 Залежність відношення $I_{a.xx} / I_{a.L}$ від тиску робочого газу. При $B=0,07$ Тл [107]

Таким чином, проведені вимірювання показали, що для даного режиму очищення, коли потрібна плазма з низькою густиною, найбільш оптимальними, з точки зору навантаження ВЧ генератора, використання його потужності, є наступні умови: величина магнітного поля $B=0,07$ Тл і діапазон тиску гелію $4,25 \cdot 10^{-3} \div 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па. А в разі, коли необхідні розряди з підвищеною густиною, необхідно, при постійному магнітному полі, підвищувати тиск робочого газу у вакуумній камері стеларатора.

Оскільки в реальних експериментах на установках Ураган-2М і Ураган-3М часто використовуються два та більше джерел електромагнітних полів,

що працюють одночасно, то необхідно оцінити вплив такої спільної роботи на навантаження рамкової антени.

В режимі очищення з напуском гелію при $B=0,05$ Тл, $P=4,65 \cdot 10^{-3}$ Па за методикою порівняння вимірних струмів в фідерній лінії і ВЧ струму в антені, викладеній вище ($Q=I_k/I_f$), були оцінені величини добротності коливального контуру рамкової антени при спільній роботі двох генераторів. Виявилось, що при роботі імпульсного джерела Каскад-1 з рамковою антеною на плазму, створену УКХ генератором, який працює у безперервному режимі ($f=135$ МГц), навантаження антени Каскада-1 ($f=3.7$ МГц) незначно знижується-приблизно на 10%. При визначенні впливу плазми, створеної джерелом Каскад-2 на навантаження антени Каскад-1, виявлено, що при одночасному включенні обох цих джерел, опір навантаження антенного контуру рамкової антени збільшується в 1,2 раза. Це можна пояснити збільшенням середньої щільності і температури плазми в цьому випадку.

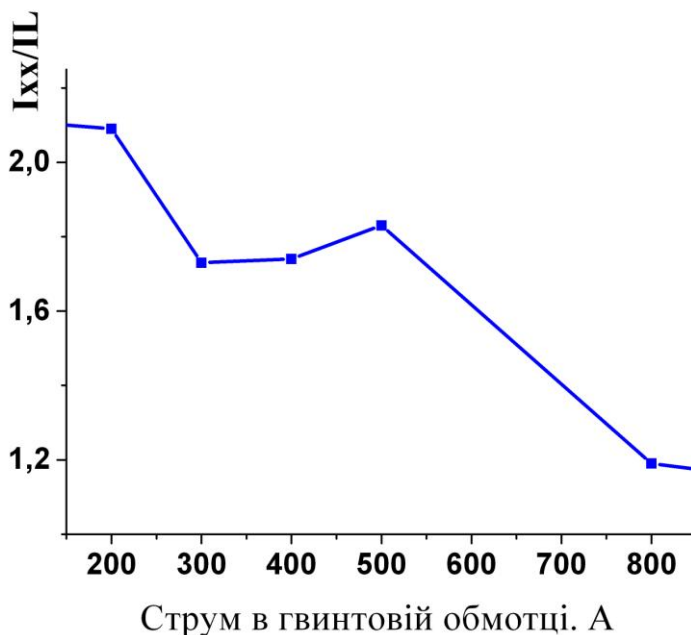


Рис. 2.7. Залежність $I_{a,xx}/I_{a,L}$ від гвинтового поля при початковій величині $B_{top}=0.05$ Тл [107]

Так само було визначено вплив гвинтового магнітного поля при початковій величині тороїдального поля рівній $B_t=0,05$ Тл на навантаження рамкової антени (рис. 2.7).

Зміни струму в гвинтовій обмотці призводять до зміни тороїдального поля за співвідношенням $I_h = 10.62 \cdot B_0 \cdot K_\phi$, де K_ϕ - коефіцієнт зв'язку для магнітного поля в даній установці, становить 0,32, B_0 -сумарне тороїдальне поле. Вимірювання проводились в режимі, коли розряди створювалися одночасно працюючими джерелами Каскад-1 і Каскад-2 і безперервно працюючим УКХ джерелом. Було зазначено, що при подачі струму в гвинтову обмотку та його збільшення до величини 200 А співвідношення струмів змінюється незначно.

Подальше підвищення струму в гвинтовій обмотці до 300 А різко зменшує навантаження антенного контуру антени. З графіка на рис. 2,7 випливає, що в діапазоні величин струму 300-600 А спостерігається, так зване, плато завантаження антенного контуру. При подальшому збільшенні струму більше 600 А в гвинтовій обмотці, навантаження антенного контуру знижується більш різко (див.рис. 2. 7) [106,107].

2.3 Вдосканалені ВЧ джерела Каскад для створення і нагріву плазми в стелараторах Ураган

Для проведення експериментів з вивчення взаємодії плазми з ВЧ антеною та джерелом ВЧ поля необхідно було провести удосконалення ВЧ обладнання на стелараторах Ураган.

Джерела ВЧ полів, призначені для створення та нагріву плазми, зазвичай складаються з джерела генерації ВЧ енергії, лінії передачі цієї енергії в навантаження, пристрою узгодження та антен.

На сучасних великих і середніх установках з вивчення фізики плазми ВЧ пристрої використовуються, в основному, в якості джерел для додаткового нагріву, і тільки в режимі очищення вони створюють плазму. Для генераторів

же Каскад-1 і Каскад-2 режим створення і нагріву плазми є основним режимом роботи. Ще однією відмінністю від інших установок є частотний діапазон. На стелараторах Ураган-2М і Ураган-3М використовуються частоти від 4-до 10 МГц, що в 6-10 разів нижче частот на інших установках (див. розділ 1). тому всі узгоджувальні пристрої, резонансні контури мають набагато більші розміри і відмінні конструкції. Характерною особливістю роботи ВЧ систем, призначених для створення та нагріву плазми, є початок роботи генератора на навантаження-режим близький до режиму холостого ходу (ХХ)-тобто режим, коли розряд ще не відбувся. І після цього протягом основного часу роботи, коли генератор навантажений вже на плазму, в цей момент величина навантаження може складати від декількох долей Ома до одиниць Ом.

ВЧ генератори Каскад сконструйовані таким чином, що враховують такий широкий діапазон зміни опору навантаження, і дозволяють забезпечити стійку роботу при створенні плазми. ВЧ генератори Каскади призначені для створення та нагрівання плазми в стелараторах Ураган-2М і Ураган-3М [108] за допомогою потужних імпульсних високочастотних коливань. Створено два однакових імпульсних ВЧ автогенератора-Каскад-1 і Каскад-2. Автогенератори зібрані за однією й тією самою схемою, мають однакову конструктивну конструкцію та практично ідентичні характеристики, лише відрізняються один від одного через розкид параметрів ламп, що використовуються. Генератори працюють незалежно один від одного. Кожен з них має своє джерело анодного живлення, свою лінію передачі, підключену через узгоджувальний пристрій до відповідної антени.

При використанні генераторів на установках Ураган-2М і Ураган-3М, зазвичай застосовуються режими роботи на різних частотах генерації ВЧ полів. Як правило, один генератор навантажений на антенну, що створює плазму, а інший-на антенну, за допомогою якої здійснюється нагрів плазми.

Конструктивна установка ВЧ генератор Каскад (далі генератор) виконана за модульним принципом. Кожен модуль розташований в окремій металевій шкафі (рис. 2.8). Вся конструкція встановлена на одному шасі

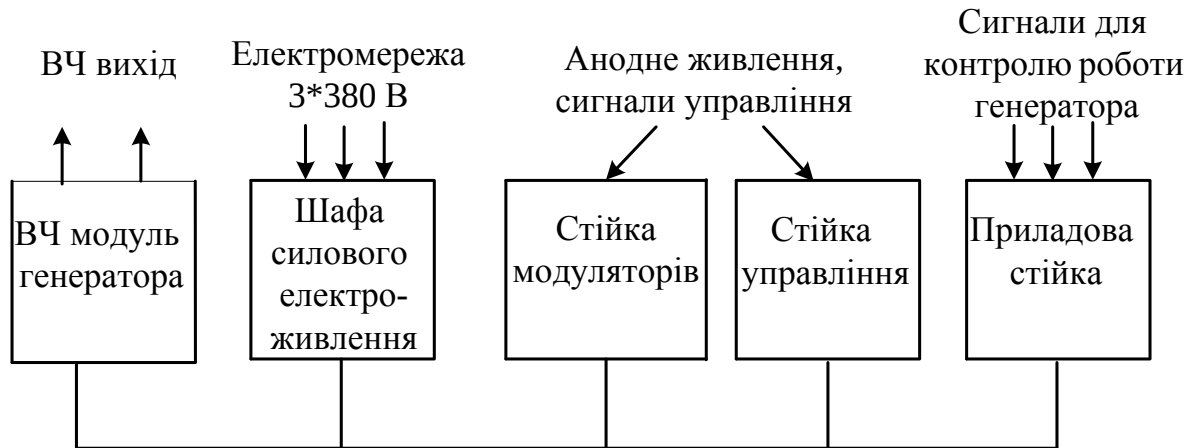


Рис. 2.8 Конструкція установки ВЧ генератора Каскад [109].

Генератори Каскад-1 і Каскад-2 можуть працювати в діапазоні частот від 1 до 20 МГц, з тривалістю імпульсу до 100 мсек. Розрахункова потужність одного генератора, при такій тривалості імпульсу, порядку 0,8 МВт. Генератори ВЧ коливань однокаскадні, зібрані за схемою двухтактного автогенератора на лампах ГИ-26А (рис. 2.9). В кожному плечі автогенератора підключено по 2 лампи паралельно для збільшення високочастотного струму в навантаженні. Застосована схема з загальним катодом з ємкотно-індуктивним зворотнім зв'язком. Такий тип зворотнього зв'язку-найбільш зручний в цій області частот, тому що величина міжелектродної ємності лампи сітка-анод цілком достатня для отримання стабільної генерації потужних ВЧ коливань. І підключення додаткового конденсатора в ланцюзі зворотного зв'язку практично не потрібно, або його ємність і, відповідно, розміри виявляються малими [105]. Величина зворотного зв'язку, під час роботи на частотах 4-6 МГц, регулюється зміною конденсаторів C_{oc} , під час роботи на частотах 8-10 МГц, -регулюється зміною величини індуктивності L_g . Ця індуктивність виконана з пластин, згорнутих у вигляді літери U.

Середня частина-рухлива, вона обертається на шарнірах, встановлених на опорних частинах індуктивності. Така конструкція дозволяє здійснювати оперативне регулювання зворотного зв'язку без доступу оператора установки всередині шафи генератора.

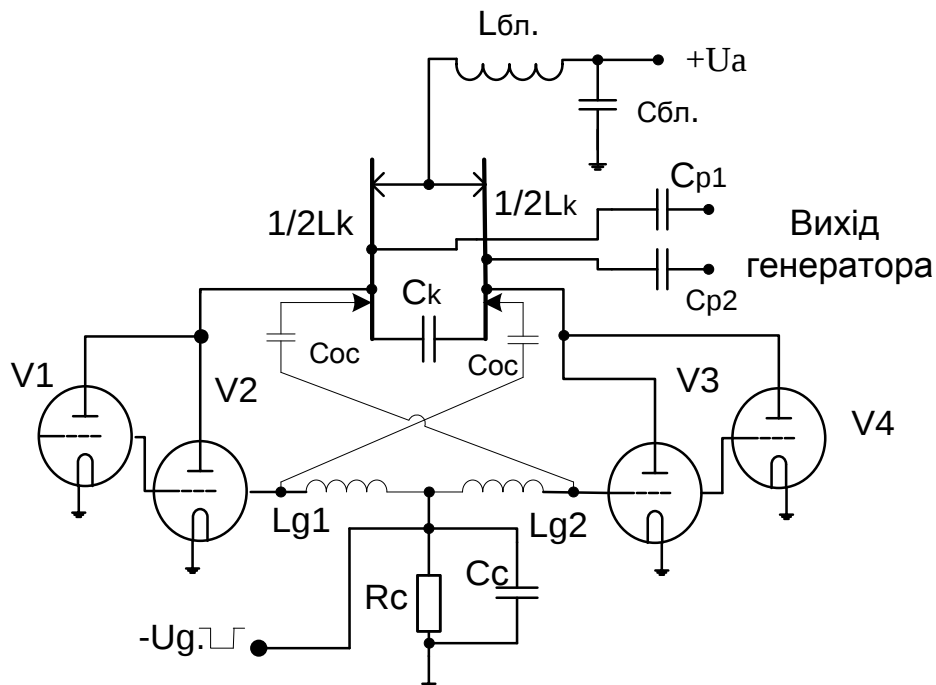


Рис. 2.9 Принципова схема ВЧ частини генератора Каскад-1 (2) [109]

В якості індуктивності анодного контура генератора, під час роботи на високих частотах, використовується короткозамкнений відрізок двопровідної лінії, утворений двома паралельними мідними трубчастими провідниками. Паралельно їм підключені конденсатори анодного контуру. Зміна частот генерованих коливань можлива двома способами. Груба перебудова здійснюється заміною конденсаторів. І тонша (плавна)-переміщенням регулюючої перемички двопровідної лінії, тобто зміною індуктивності анодного контуру. Оскільки опір контуру генератора описується формулою, $R_k = \rho \cdot Q$, а, $\rho = \sqrt{L/c}$, де ρ , Q -відповідно: хвильовий опір і добротність контуру, і залежить від величини індуктивності контуру, то при такому способі перебудови частот одночасно змінюється і коефіцієнт включення навантаження p . При цьому відбувається неузгодженість ВЧ

тракту. Як правило, генератори працюють у двох частотних діапазонах 3–5 та 6-10 МГц. ВЧ потужність з контура генератора передається через розподільні конденсатори в лінію передачі ВЧ енергії до антени по фідерній лінії, що складається з чотирьох фідерів: по два паралельних фідера (використовується радіочастотний кабель РК-50-11-13), включених в одне плече генератора, з хвильовим опором 25 Ом. При такій максимальній довжині кабелю для Урагана-2М затухання сигналу становит ≈ 0.286 дБ. В одному з плечей генератора підключено рефлектометр для вимірювання ВЧ потужності за співвідношенням падаючої та відбитої хвилі в передачі ВЧ енергії.

Для узгодження вихідного опору генератора з опором навантаження були побудовані різні узгоджувальні пристрої. В основному, була використана автотрансформаторна схема узгодження з паралельним контуром, утвореним індуктивністю антени L_a , і конденсатором C_a , підключеними паралельно один одному (рис. 2.10). Причому, величина індуктивності автотрансформатора L_c вибирається приблизно в 5 разів більше, ніж індуктивність антени L_a . Коефіцієнт включення фідера в антенний контур регулюється дискретно, шляхом зміни кількості підключених витків узгодженого автотрансформатора.

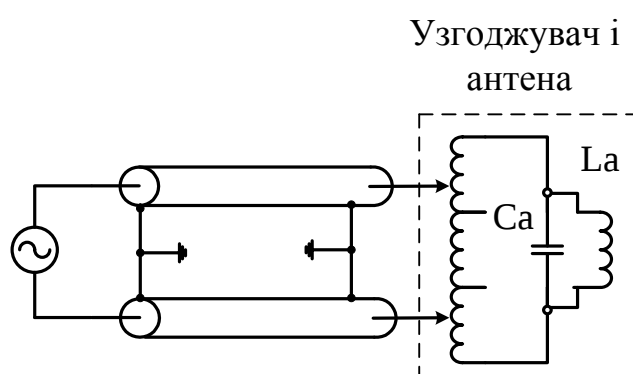


Рис. 2.10 Блок- схема передачі ВЧ потужності від генератора в антену-і плазму [103]

Крім того, в самому генераторі передбачена можливість регулювання коефіцієнта зв'язку з навантаженням, що теж є елементом узгодження.

Критерієм узгодження була потужність ВЧ коливань, що передається в антену- P_n . Для визначення потужності був обраний метод на основі вимірювання співвідношення рівня падаючої та відбитої хвилі у ВЧ тракці, проведеного за допомогою направленої відгадуювача.

Потужність ВЧ коливань визначається за формулою $P_a = \frac{k}{c} \cdot (U_n^2 - U_o^2)$, де U_n -напруга, створювана падаючою хвилею ВЧ коливань. U_o -напруга, створювана відбитою хвилею ВЧ коливань, k - коефіцієнт, визначений при калібруванні спрямованого відгалужувача, ρ - хвильовий опір фідера.

Використовувані в автогенераторі лампи, вимагають рідинного охолодження всіх трьох своїх електродів (анод, катод та сітка). Охолодження сіткового ланцюга і ланцюга напруження одного плеча організовано послідовно. Це мінімізує кількість шлангів в модулі генератора. Для аварійних випадків, коли відключається за певною причиною, електроенергія або вода в системі охолодження зникає при роботі генератора, використовується додатковий бак охолодження. Це забезпечує можливість у разі аварійної ситуації зберегти лампи генератора, попереджаючи їх перегрівання. В якості охолоджувальної рідини використовується вода.

Джерелом анодної напруги є накопичувач ємністю 1800 мкФ, що складається з чотирьох секцій конденсаторів, включених послідовно. На рис. 2.11 зображена перша секція накопичувача. Внутрішні секції розбиті на групи від 8 до 10 конденсаторів типу ІМ-5-150 та ІМ-5 - 140 ємністю 150 і 140 мкФ відповідно. Кожна така група приєднана до вихідної шини напруги через окремий запобіжник. При виході з ладу однієї з груп, інші залишаються працездатними.

Всі секції ізолювані одна від одної керамічними ізоляторами, що витримують цю напругу. Джерелом постійного струму для заряду конденсаторів накопичувача є регульований високовольтний випрямляч ТДЕ-5/20 з максимальною вихідною напругою 20 кВ.

Анодна напруга з накопичувача подається на лампу генератора через тиристорний ключ, керування якого здійснюється від спільної стійки синхронізації стеларатора, що забезпечує синхронізацію роботи всіх пристроїв установки. Тривалість імпульсу генератора регулюється шляхом управління сітковим тиристорним ключом, який подає негативну напругу на керуючі сітки ламп генератора.

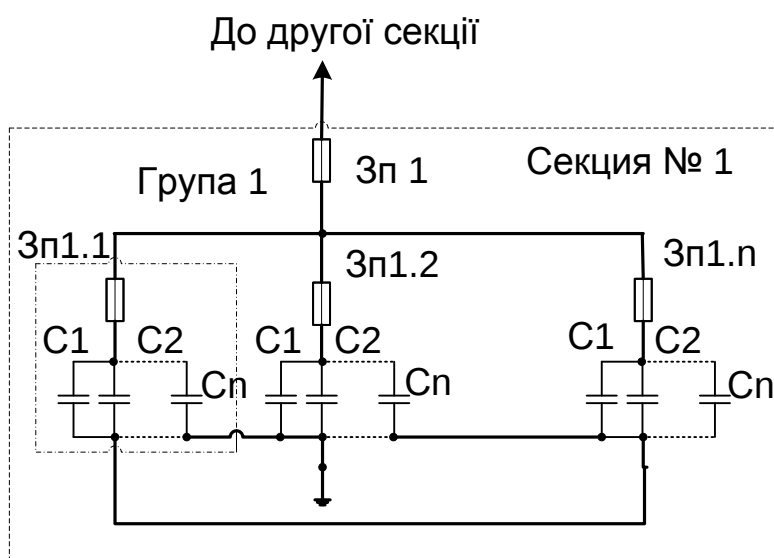


Рис. 2.11 Принципова схема першої секції конденсаторного накопичувача [109]

Тиристорний анодний ключ виконаний триступінчатим (рис. 2. 12). Така схема застосовується для керування величиною анодної напруги під час створення плазми. Це зменшує напругу на високовольтних ізоляторах антени на початку імпульса, коли антенне навантаження мале або відсутнє. Ключ працює наступним чином. В перший момент часу t_0 відбувається включення ВЧ генератора шляхом подачі зі стійки синхронізації відчиняючого імпульсу на керуючий електрод тиристора $V3$. На аноди лампи від накопичувача подається знижена анодна напруга на величину, рівну падінню напруги на резисторах R_1 і R_2 при протіканні струму. Навантаження генератора мале і генератор працює практично в режимі холостого ходу. В подальшому, для

підвищення напруги у навантаженні до максимального, включаються тиристори V1 (точка t1) і V2 (точка t2), які шунтують відповідні резистори. Величини резисторів R_1 і R_2 підібрані таким чином, щоб забезпечити оптимальний режим формування імпульсу анодної напруги [103,109,110].

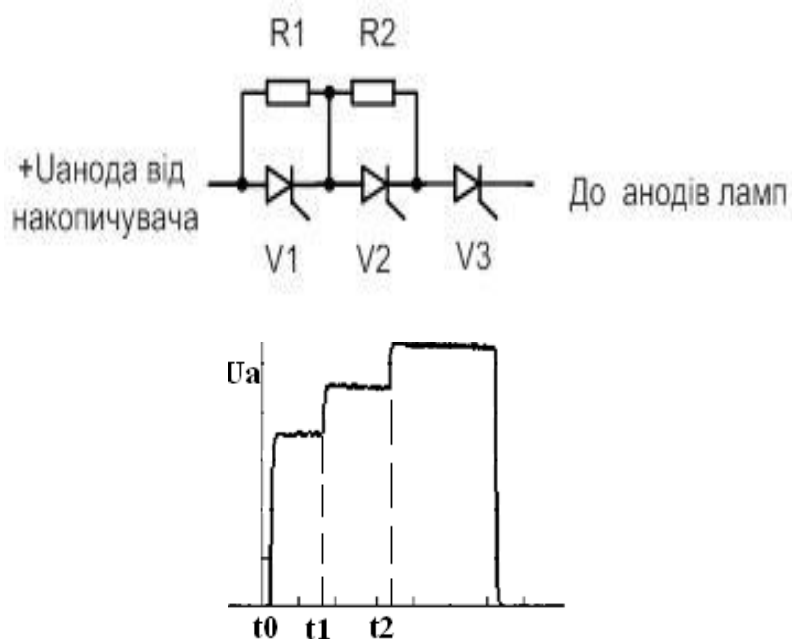


Рис. 2.12 Схема анодного тиристорного ключа (ліворуч) і часова діаграма імпульсу анодної напруги (праворуч) [103,109]

При проведенні експериментів на установці Ураган-2М були використані антени різних конструкцій з різною величиною власної індуктивності і активного опору. Антени виконувалися з нержавіючої сталі як з покриттям нітриду титану, так і без покриття. Діапазон індуктивностей антенн-від 0,3 мкГн до 1,32 мкГн. В даний час для проведення експериментів на стелараторах Ураган-2М і Ураган-3М встановлено по дві ВЧ антени. Для створення плазми в стелараторі Ураган-2М використовується антена рамочного типу з індуктивністю 1,32 мкГн, а в стелараторі Ураган-3М антена такого ж типу, але з індуктивністю 1,4 мкГн [111]. Внесений плазмою опір r_n в контур такої антени становить від 0,5 до 6 Ом [112].

Для нагрівання плазми в стелараторі Ураган-3М використовується тринапіввіткова антена з індуктивністю 0,23 мкГн, а в стелараторі Ураган-2М

антени типу «колінвал» з індуктивністю $L_a=0,49$ мкГн, або чотиринапіввтікова (значення індуктивності разом з встановленими виводами—0,2 мкГн) [113].

Що до ВЧ джерела Каскад зі складною резонансною системою. Для підвищення ефективності нагріву плазми за рахунок підвищення стабільності рівня ВЧ енергії, переданої в плазму в умовах мінливого плазмового навантаження, а також для спрощення конструкції генератора, зокрема анодного коливального контуру, та процесу настройки всього ВЧ тракту, була розроблена схема ВЧ генератора, що використовує резонансні властивості фідерної лінії передачі ВЧ енергії. Як з'ясувалося в процесі експлуатації ВЧ генераторів Каскад, елементи анодного контура в процесі роботи нагрівалися, що призводило до нестабільності частоти генерованих коливань генератора. Дана схема дозволяє відмовитися від використання індуктивності та конденсаторів анодного контура, що застосовувалися раніше, і, отже, усуває цей недолік попередньої конструкції.

Відомо, що в довгій лінії без втрат, амплітуди напруги та струму являють собою функції точки на лінії [114]. Для короткозамкнутої лінії вони визначаються за формулами

$$u_x = I_2 \cdot c \cdot \sin \beta x \cdot \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) \text{ і } i_x = I_2 \cdot c \cdot \cos(\beta \cdot x) \cdot \cos(\omega_0 t).$$

А для розімкнутої лінії

$$u_x = U_2 \cdot \cos(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t) \text{ і } i_x = U_2 \cdot \cos(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t),$$

де: U_2 і I_2 напруга і струм на кінці лінії, ρ -характеристичний (хвильовий) опір лінії, α -постійна зсуву фази. Це означає, що на дроті в будь-який момент існують, так звані, вузли напруги – це точки, де напруга дорівнює нулю, і пучності напруги—точки, де напруга досягає максимального значення. Причому, для короткозамкнутої лінії пучності напруги розташовані в точках розташованих від кінця лінії на відстані l , кратній непарних чисел чвертей довжини хвилі- $l = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$, де $n=1, 3, \dots$. Для розімкнутої ж лінії, за тією ж формулою, але де $n=2, 4, \dots$, тобто парному числу чвертей хвилі в лінії.

У випадку, коли лінія навантажена на активний опір, що дорівнює її хвильовому опору, маємо наступні рівняння для напруги та струму:

$$u_x = U_2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha \cdot x) \text{ і } i_x = \frac{U_2}{\rho} \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha \cdot x).$$

За такої умови в лінії існують тільки хвилі, що біжать - відбувається перенос енергії від джерела до навантаження. Цей режим і є бажаним для будь-якого ВЧ генеруючого пристрою. Дані властивості довгої лінії були використані в модифікації генератора Каскад [115].

На рис. 2.13 зображена принципова схема одного плеча (для спрощення розуміння, тому що схема другого плеча ідентична), джерела Каскад зі складною резонансною системою. До активного елементу-електронній лампі Л1 через розділову ємність C_p приєднана резонансна система, яка утворена ємністю і індуктивністю довгої ВЧ фідерної лінії передачі (ФЛП), антенним коливальним контуром, що складається з конденсатора C_a і індуктивності антени L_a .

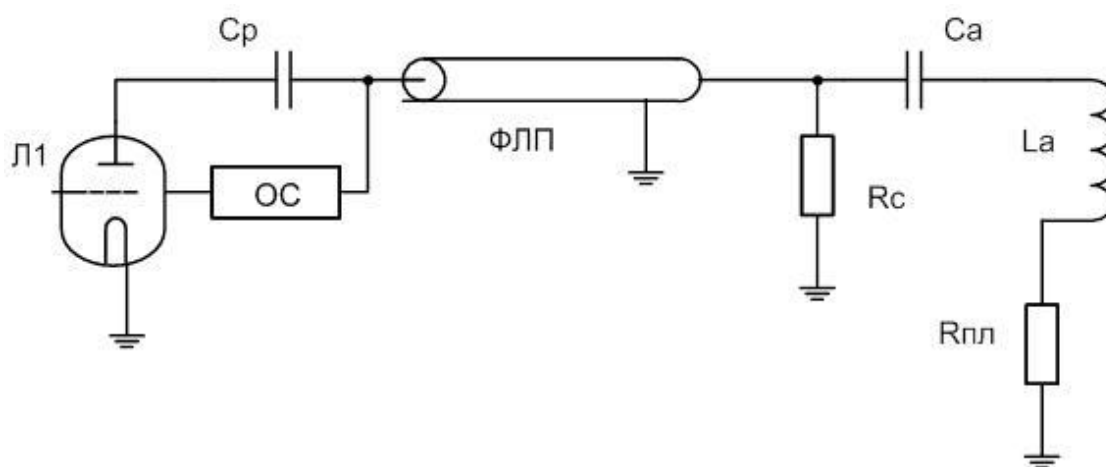


Рис. 2.13 Функціональна схема генератора Каскад зі складною резонансною системою (одне плече) [115]

Причому, до виходу фідерної лінії передачі підключений і резистор R_c з опором, що дорівнює хвильовому опору фідерної лінії передачі. До керуючої сітки підключено ланцюг зворотнього зв'язку для забезпечення умов генерації. Сигнал зворотнього зв'язку береться зі входу фідерної лінії

передачі після конденсатора C_p . Довжина лінії передачі повинна бути кратна непарному числу чвертей довжини хвилі коливань, що генеруються. Антенний контур налаштовується на одну з власних резонансних частот лінії передачі. Величина компенсуючої ємності C_a визначається зі співвідношення

$$C_a = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot L_a}, \text{ де } f\text{-частота ВЧ коливань, } L_a\text{-індуктивність антени. При}$$

цьому антенний контур з внесеним опором навантаження від плазми буде мати реактивний опір, близький до нуля. І вся ВЧ потужність від активного елемента передається в опір антенного контуру. На частотах, відмінних від резонансної, антенний контур являє собою великий комплексний опір, який перевищує за величиною баластний резистор R_c (хвильовий опір передавальної лінії). І для цих частот фідерна лінія передавання виявиться навантаженою на узгоджений опір і не має власних резонансних частот.

Для джерела Каскад-1 довжина передавальної лінії складала 55 м. Вона була взята за тричетверковий відрізок довжини хвилі λ , яка рівняється 73,3 м в фідері. Що відповідає частоті генерації 2,73 МГц. При індуктивності антенни=0,067 мкГн, ємність конденсатора C_a антенного контура, складала 4880 пФ.

Особливе місце слід відвести в даній схемі узгодженню навантаження генератора з навантаженням антени. У цьому випадку узгодження здійснювалося вибором кількості фідерів лінії передачі, тобто зміною її хвильового опору ρ . Передавальна лінія для одного плеча генератора була утворена з 4 фідерів з величиною хвильового опору $\rho = 12,5$ Ом для опору, що вноситься, плазмою в антенний контур, рівного—3 Ома.

Тепер про додаткове ВЧ обладнання. ВЧ фідерний перемикач. Для здійснення створення і нагріву плазми ВЧ методом в сучасних великих термоядерних установках (токамаках, стелараторах) використовуються ВЧ джерела, здатні працювати в квазістаціонарному режимі, при рівні потужності, що вводиться в антену, порядку декілька мегават. Налагодження режимів таких ВЧ пристроїв, як правило, здійснюється на еквівалент

навантаження. Тому виникає необхідність перемикання фідерів лінії передачі від антени на навантаження і назад. Коли лінія передачі ВЧ енергії складається з декількох потужних фідерів, то комутація їх відводів є досить трудомістким і тривалим процесом. Для автоматизації цього процесу і було розроблено даний пристрій (рис. 2.7). ВЧ перемикач призначений для оперативного підключення до генератора одного з двох заздалегідь обраних навантажень. Причому, вхідний імпеданс перемикача дорівнює хвильовому опору лінії передачі ВЧ енергії. За допомогою цього перемикача здійснюється підключення до однієї фідерної лінії, що підводить енергію від генератора, двох таких самих ліній, що йдуть до різних навантажень. Підключення всіх ВЧ фідерів здійснюється зверху перемикача. Внизу розташований електропривід, керуючий переміщенням рухомого елемента перемикача. У центральній частині, по осі перемикача розташовані внутрішні провідники, виконані у вигляді кілець з однаковим внутрішнім діаметром, а зовнішні діаметри у них різні. Верхній менше середнього, який, в свою чергу, менше нижнього. Це зроблено для забезпечення зручності під'єднання фідерів до перемикача. Причому кожне кільце призначене для підключення тільки одного джерела. Центральні жили фідерів підключаються до спеціальних нерухомих контактів на кільцях. Кільця мають складну форму, що забезпечує ВЧ розв'язку і безпечну роботу при високих напругах. Комутація навантажень здійснюється переміщенням рухомого контакту-поршня, встановленого всередині кілець, висота поршня дорівнює відстані між сусідніми кільцями. Причому, між кожним з кілець і корпусом перемикача встановлена розподілена ємність, яка спільно з паразитною індуктивністю, утвореною внутрішніми провідниками підключених фідерів і корпусом перемикача, утворює фільтр нижніх частот з частотою зрізу вище верхньої робочої частоти ВЧ джерела. Розроблено конструкції перемикача для різних рівнів ВЧ потужностей: до 500 кВт протягом 100 мс, для підключення ліній передачі з хвильовим опором 25 Ом. До такого перемикача приєднуються по 2, паралельно підключених, ВЧ фідера марки

РК 50-19-21 по кожному напрямку. А також перемикач для потужностей до 1,0 МВт при тривалості імпульсу 100 мс, для підключення передавальної лінії з хвильовим опором 4,16 Ом. До такого перемикача приєднуються по 12 ВЧ фідерів марки РК 50-24-17 по кожному напрямку [116].

Щодо ВЧ потужного баластного навантаження. Для налаштування генераторів Каскад була розроблена конструкція потужного ВЧ широкосмугового навантаження (рис. 2.14). Основним навантажувальним елементом є резистор типу УВЛ-1 $50 \pm 10\%$ №64 номіналом 50 Ом. Можна використовувати резистори цього ж типу, але з номіналом, наприклад, 75 Ом. Номінальна потужність навантаження—50 кВт в безперервному режимі, діапазон робочих частот—до 150 МГц. В імпульсному режимі, при тривалості імпульсу 20 мс, в навантаження вводилося 800 кВт ВЧ потужності. Резистор поміщений у герметичний корпус і охолоджується проточною водою з витратою $3,6 \text{ м}^3/\text{год}$ при номінальній ВЧ потужності. Зверху корпуса розташований ВЧ вимірювальний порт, до верхнього фланця якого приєднано вхідний пристрій для підключення ВЧ фідера від генератора.



Рис. 2.14 ВЧ фідерний перемикач (зліва), ВЧ потужне баластне навантаження (праворуч)

Порт має 5 спеціальних вікон діаметром 48 мм для установки діагностичних вимірювальних пристроїв і дозволяє підключати одночасно 5 різних датчиків для вимірювання ВЧ коливань струму, які надходять на навантаження від випробовуваного джерела. Наявність такого порту також дає можливість проводити перевірку або калібрування одночасно чотирьох датчиків (наприклад дільників напруги) при наявності одного еталонного [117].

2.4 Особливості вимірювань ВЧ параметрів на стелараторах Ураган

Оскільки генератори Каскад виконані за однокаскадною схемою (мал 2.2), то зміни навантаження генератора надають сильний вплив безпосередньо на контур автогенератора, змінюючи його робочі умови, оскільки змінюється опір контура: як активний, так і реактивний. Цей вплив позначається також на узгодженні всієї ВЧ системи: при постійному хвильовому опорі ρ фідера змінюється опір контуру генератора $Z_{\text{кг}}$ і опір контуру антени $Z_{\text{ка}}$. Зміни еквівалентного опору контура призводять до зміни режиму роботи автогенератора аж до переходу з критичного в напружений режим і назад. Неузгодженість, викликана зміною імпедансу навантаження антени, призводить до погіршення ефективності роботи ВЧ систем, а саме: знижується вихідна корисна ВЧ потужність, вкладена в навантаження; за рахунок виникнення відбитої хвилі, порушується робота генератора, тобто можливий вихід з ладу його активних елементів, або зменшення величини генеруємої ВЧ потужності, збільшується вірогідність виникнення ВЧ пробойів у фідерах лінії передачі. Необхідне поліпшення якості узгодження та збільшення енерговитрат у навантаженні вступає в протиріччя з явищем зміни імпедансу навантаження. Такі зміни режимів роботи позначаються на потужності та спектрі вихідних коливань у всій ВЧ системі. При проведенні експериментів на установках Ураган-2М і Ураган-3М було виявлено, що в більшості

випадків спектр ВЧ струму в антені був багатомодовим. Гармоніки струму з номерами 3, 4 і 5 іноді досягли 50% за величиною напруги від рівня першої гармоніки. А на стелараторі Ураган-3М в деяких експериментах значні були навіть 7-й і 9-й гармоніки.

Основними параметрами роботи ВЧ генератора є частота та потужність коливань у навантаженні. Вище було розглянуто умови узгодження в разі настройки антенного контуру в резонанс з частотою генератора. На практиці ця умова часто не виконується. Розглянемо випадок, коли антенний контур є розстроєним по відношенню до контуру генератора. У цьому випадку він має комплексний опір. Умови передачі максимальної потужності у навантаження - це рівність опору контура автогенератора Z_g у точці відбору потужності та опору навантаження Z_n , підключеного до цієї точки.

$$\text{Причому: } Z_g = 1 / (\omega^2 \cdot C^2 \cdot R_{kg}) = \omega^2 \cdot L_{kg}^2 / R_{kg} = L_{kg} / (\omega \cdot R_{kg}) = X_{kg}^2 / R_{kg},$$

Де X_{kg} і R_{kg} - це відповідно реактивний та активний опір контура автогенератора. А в вираженні для опору навантаження, де X_{ka} , R_{ka} - реактивний і активний опір контуру антени, відповідно, необхідно враховувати вплив плазми- $Z_{пл}$, як частини навантаження для антенного контуру. З радіотехнічної точки зору-це внесений плазмовий опір в антенний контур (в антену) або еквівалентний опір навантаження контура - плазми: $Z_{пл} = R_{пл} + iX_{пл}$. Тоді для навантаженого контура антени

$$Z_{кан} = X_{кан}^2 / R_{кан} = (X_{ka} + X_{пл})^2 / (R_{ka} + R_{пл}).$$

Це навантаження на антенний контур $Z_{пл}$ залежить від багатьох факторів: як постійних протягом імпульсу роботи генератора так і тих, що змінюються в часі. До постійних можна віднести геометричні характеристики антени, відстань між антеною та плазмовим шнуром, величина магнітного поля в камері, тиск робочого газу. Змінними параметрами, що впливають на величину вносимого опору, є параметри самої плазми-це: температура, густина, профіль шнуру та ін. Ступінь зміни цих параметрів під час ВЧ

імпульсу, як сказано вище, може бути великою від долі ома до порядку 10 Ом.

На стелараторі Ураган-2М вимірювання ВЧ потужності генератора здійснювалося шляхом вимірювання напруги падаючої та відбитої хвилі за допомогою спрямованого відгалужувача (СВ), який підключений до виходу генератора (тільки в одному плечі) перед лінією передачі ВЧ потужності у навантаження. СВ представляє собою конструкцію фідерного типу з центральним струмом та екрануючим циліндром діаметром 150 мм, всередині якого розташовані діагностичні петлі, навантажені на опір, узгоджений з хвильовим опором відгалужувача. Паралельно з цим, також проведені вимірювання ВЧ напруги на антені та струму в антені. Для перевірки показань СВ в режимах роботи на неузгоджене навантаження, коли в спектрі генератора сигналу присутні вищі гармоніки струму основної частоти, були проведені дослідження ВЧ спектра у навантаженні.

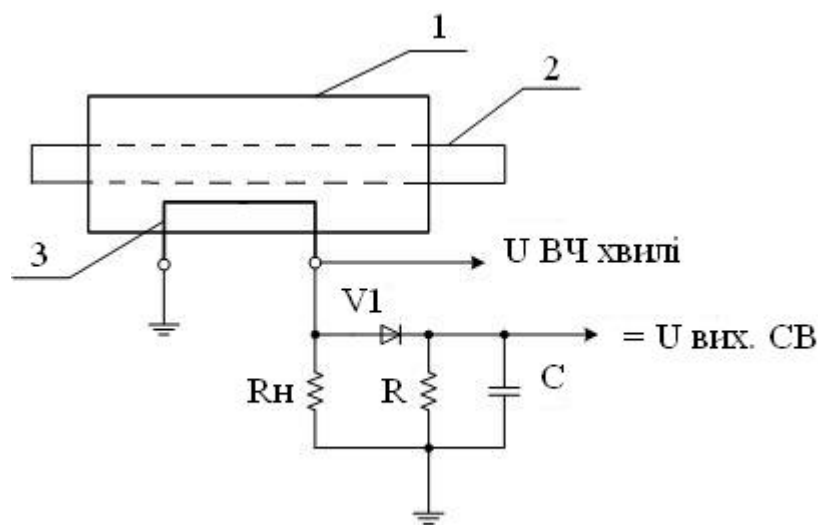


Рис. 2.15 Схема вимірювання напруги, хвилі, що падає і відбитої в лінії передачі ВЧ потужності [109]

Для цього вимірювався ВЧ сигнал, що знімається з петлі СВ без детектування та фільтрації. При цьому всі елементи: (рис. 2.1 5) діод V1, резистор R і конденсатор фільтра C, відключаються від петлі СВ, крім

навантажувального резистора, номінал якого дорівнює хвильовому опору СВ 75 Ом.

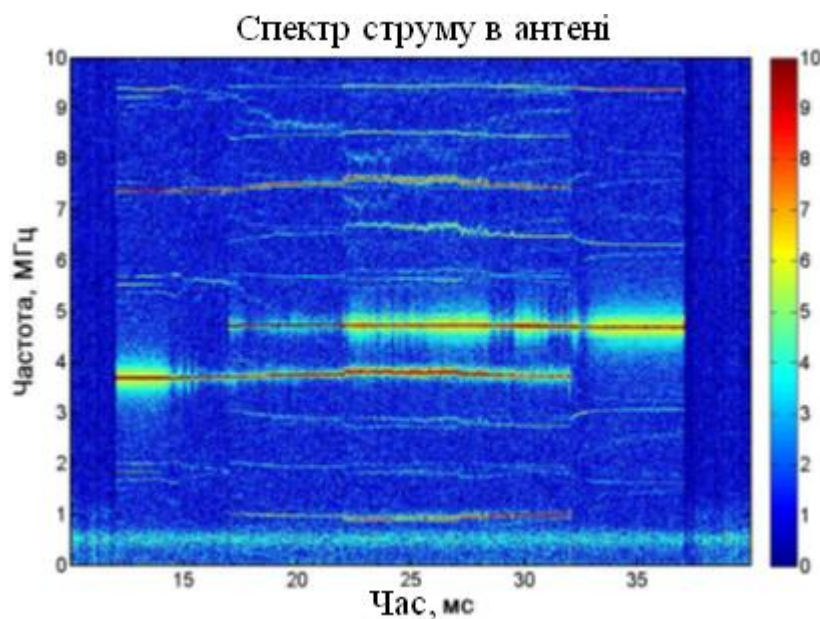


Рис. 2.16 Спектр ВЧ струму в рамковій антені при одночасній роботі двох джерел Каскад на різних частотах [118]

Вимірювання показали, що в спектрі цього сигналу крім першої гармоніки, істотно помітні і вищі гармоніки, аж до четвертої включно.

Вивчення спектра ВЧ струму в рамковій антені було також проведено при одночасній роботі двох джерел електромагнітних полів Каскад, які працювали на різних, але близьких за значенням, частотах. Причому, джерело Каскад-1 генерувало ВЧ коливання з частотою 3,7 МГц, а частота коливань другого джерела Каскад-2 дорівнювала 4,7 МГц. На рис. 2.16 наведено спектр частот, який був зафіксований в цьому режимі. На осі часу нульова відмітка 0-є початком генерації ВЧ імпульсу джерелом Каскад-1. На 17-й мілісекунді здійснювалося включення джерела Каскад-2. На рис. 2.16 добре видно спектральні лінії основних частот генераторів (3,7 та 4,7 МГц). При детальному вивченні даного спектра були виявлені і інші гармоніки основних частот обох генераторів, на рис. 2.16 показані тільки другі гармоніки основної частоти кожного генератора. Також, помітна і частота, що дорівнює різниці між основними, що генеруються, частотами генераторів,

тобто різницева. Більш слабкі лінії (малої амплітуди сигнали) різних комбінацій різниці і суми сильніших коливань. Також, слід зазначити момент часу після 22 мсекунди. У цей момент сталася невелика стрибкоподібна зміна частоти першої гармоніки генератора Каскад - 1 (з 3,7 МГц до 3,8 МГц). Цей же стрибок частоти помітний і на лінії другої гармоніки. Причому, відрізок часу з 22 -й по 28-у мс (відразу після зміни частоти) характерний тим, що на цьому відрізку зростає амплітуда струму основної гармоніки другого генератора (4,8 МГц) і збільшуються струми деяких комбінаційних частот, наприклад 6,5 МГц, 8,5 МГц і 2,8 МГц. Цікавий також відрізок часу після 32-ї мс, коли закінчився ВЧ імпульс генератора Каскад - 1 (3,7 МГц). На спектрограмі чітко видно лінії частот 3,15, 6,3 і 9,4 МГц. Частота 9,4 МГц це частота другої гармоніки працюючого генератора Каскад-2. Решта частоти можливо утворені вже взаємодією ВЧ електромагнітного поля з частотою 4,7 МГц з плазмою.

Таким чином, за час генерації ВЧ імпульсу двох ВЧ джерел, були зафіксовані, щонайменше, 8 різних комбінаційних частот, крім двох основних. Виходячи з наведеного вище, можна зробити висновок, що процеси, що відбуваються в плазмі під час ВЧ імпульсу, впливають як на величину основної частоти генерованих коливань, так і на кількість її гармонік і їх амплітуду. Також в процесі розряду виникають комбінаційні частоти, що дорівнюють сумі-різниці основної та інших вищих гармонік обох генераторів в різних їх поєднаннях.

Для вимірювань ВЧ параметрів використовувались ємнісні дільники напруги оригінальної конструкції та датчики ВЧ струму, які також спеціально розроблені для цього. У дільнику напруги вхідна високовольтна ємність виконувалася у вигляді саморобного конденсатора (циліндричного або плоского) з фторопласту Ф-4.

Для вимірювання струмів застосовувалися датчики струму різних конструкцій. Добре зарекомендував себе датчик струму на основі симетричної рамки, розташованої в діелектричному корпусі, який кріпиться

безпосередньо на провідник з вимірюваним струмом. Оскільки на установках з дослідження плазми радіотехнічні вимірювання проводяться в умовах впливу сильних електричних і магнітних полів, все це створює великі перешкоди, особливо при вимірюваннях ВЧ струмів і напруг на антенних пристроях. Така диференціальна конструкція датчика струму дозволяє уникнути або зменшити синфазну (зовнішню) складову сигналу перешкоди при вимірюваннях струму.

Ступінь компенсації струмів від сигналів перешкод визначається симетрією витків рамки, а також потрібно мати у своєму розпорядженні провідник з вимірюваним струмом розташований по центру по відношенню до рамки. Кожне плече рамки має форму квадрата. При ширині провідника, що підводить струм в антену, 5 см рамка мала плечі розміром 2,5 см×2,5 см. Товщина шару діелектрика між рамкою і провідником-1,5 см. Висота корпусу—4 см. Весь провідник рамки і внутрішній простір між ним і діелектричним корпусом заливалися парафіном, щоб усунути повітряний зазор між корпусом і провідником рамки, тим самим запобігти пробойів. Датчик струму встановлювався таким чином, щоб площа рамки була паралельна площині провідника з вимірюваним струмом.

Сигнали з подільників напруги і датчиків струму надходять на розв'язуючий пристрій, що узгоджує (РПП) (рис. 2.17), який представляє собою Т-подібний резистивний атенюатор (R_1 , R_2 , R_3), до входу якого підключений датчик струму.

Вихід атенюатора навантажений на розв'язуючий ВЧ широкосмуговий трансформатор ТР1. Вторинна обмотка цього трансформатора приєднана одним відводом до такого ж Т-подібного атенюатору (R'_1 , R'_2 , R'_3). Другий відвід вторинної обмотки трансформатора заземлений на загальний провід системи вимірювань.

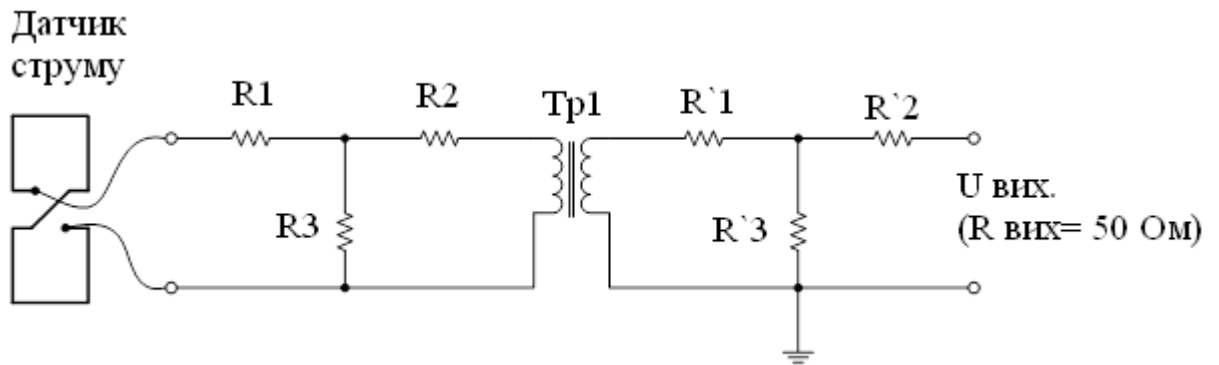


Рис. 2.17 Електрична принципова схема РПП [118]

Таким чином, датчик струму відірваний від вакуумної камери стеларатора-«землі», і в разі його пробоя прилади та пристрої системи вимірювань виявляються в безпеці. Сигнал датчика струму з виходу другого атенюатора через фідерні лінію зв'язку подається на вимірювальний пристрій. Номінали резисторів підібрані таким чином ($R_1=R'_1=R_2=R'_2=26\text{ Ом}$, $R_3=R'=35\text{ Ом}$), щоб вихідний опір РПП дорівнював хвильовому опору фідера лінії зв'язку, тобто 50 Ом [118].

В результаті проведених вимірювань було виявлено, що в спектрі сигналів, що знімаються з СВ, амплітуда першої гармоніки менше, а амплітуди вищих гармонік (2, 3 і 4-й) дещо вище, ніж у сигналі з датчиків напруги та струму, встановлених на навантаження. А це призводить до помилок при вимірюванні потужності за допомогою СВ. Були проведені дослідження зміни спектру частот в антені по всій довжині ВЧ імпульсу генератора [119].

На рис. 2.18 представлені зміни 2, 3, 4-й і навіть 9-й гармонік, в ході ВЧ імпульсу ($f_0=8,5\text{ МГц}$) генератора Каскад-1 на установці Ураган-3М, коли ВЧ потужність вводиться в плазму за допомогою неекранованої рамочної антени [119]. Ток в антені $I_{\text{ант}}$, з достатньою точністю, був пропорційний напрузі U_k [120,121]. Графік вгорі відповідає першій мілісекунді ВЧ імпульсу. Це момент часу, практично холостого ходу, коли плазми ще немає, і опір навантаження (внесений опір в контур) дуже малий і, практично, не впливає

на параметри узгодження. Бачимо, що перша гармоніка ВЧ сигналу генератора є домінуючою.

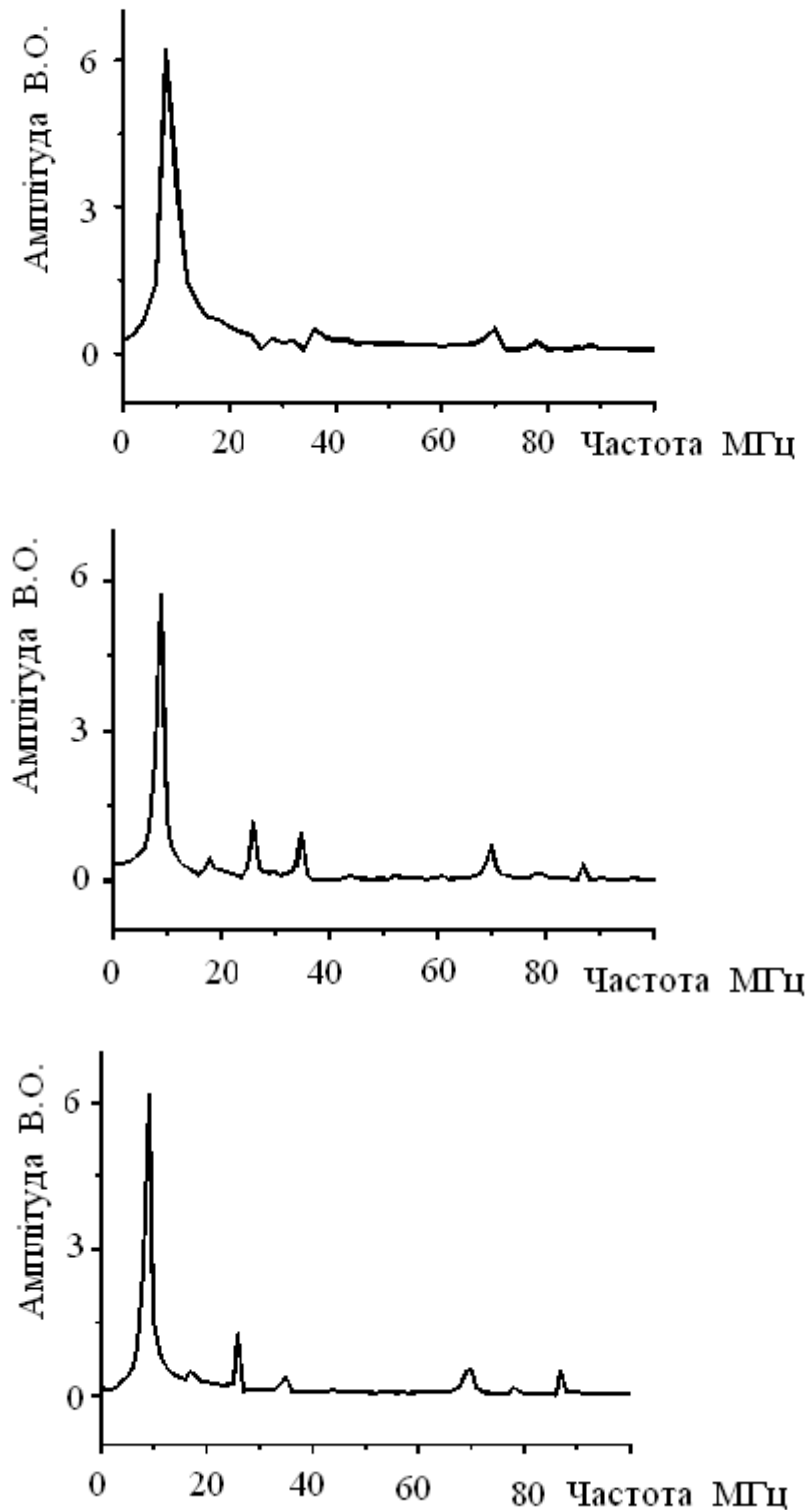


Рис. 2.18 Фур'є спектри ВЧ струму в антені протягом ВЧ імпульса генератора Каскад-1 ($f_0=8.5$ МГц). Вгорі-на 1-й мс, у середині-на 5-й мс, внизу-на 45-й мс [118]

Середній графік (5-та мс) відповідає моменту високого навантаження антени плазмою. У цей відрізок часу плазма вже створена і має досить високу густину і температуру. Тут ми бачимо, що в спектрі тока у антені з'явилися 3-я, 4-а і 9-а гармоніки.

Їх поява та амплітуда пояснюються неузгодженістю ВЧ тракту, викликаною високим опором навантаження, внесеним плазмою в антенний контур.

На графіку внизу бачимо сигнал третьої гармоніки, але він вже менший, ніж на попередньому. Цей момент часу відповідає кінцю ВЧ імпульсу, коли густина плазми і її температура змінювались, міг змінюватися також і профіль плазмового шнура. І все це призвело до того, що змінився опір навантаження антенного контуру. В результаті цього змінилися умови узгодження ВЧ тракту з джерелом ВЧ коливань (генератором), що призвело до виникнення вищих гармонік в антені (в даному випадку виникла друга гармоніка).

2.5 Придушення гармонік у лінії передачі ВЧ потужності в антену

Для усунення впливу вищих гармонік на роботу ВЧ тракту, підвищення точності вимірювань СВ, а також для поліпшення умов фізичного експерименту (коли в плазму вводиться ВЧ потужність однієї частоти, а не спектру частот) було проведено модернізацію ВЧ генератора. Був розроблений і встановлений на виході генератора (у кожному плечі) фільтруючий резонансний контур (ФРК) (рис. 2. 19). Він утворюється індуктивністю $L_{\text{фрк}}$ і ємністю $C_{\text{фрк}}$.

Паралельний коливальний контур, який настроюється на частоту, близьку до частоти основної (першої) гармоніки генератора має великий опір для коливань цієї частоти і не перешкоджає їх розповсюдженню в навантаження.

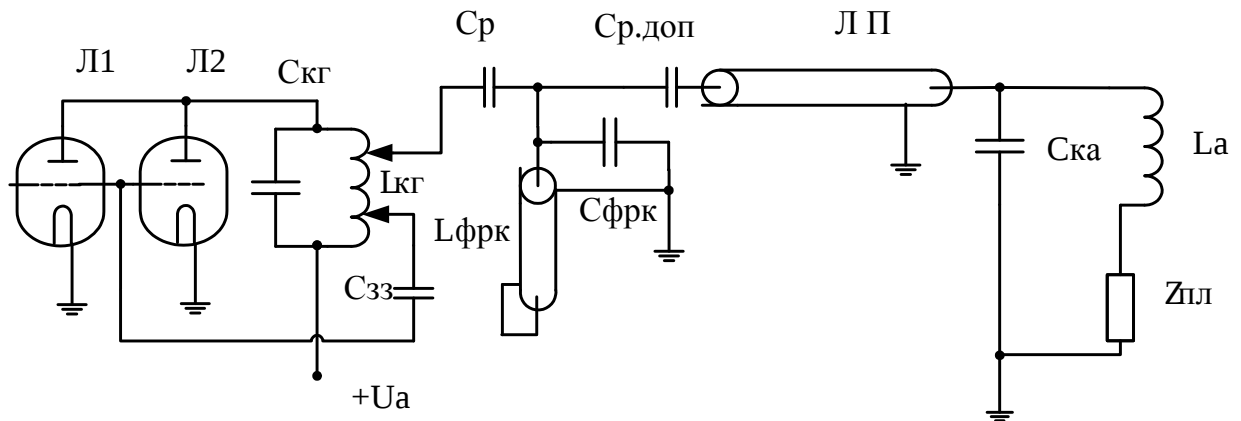


Рис. 2.19 Схема включення фільтруючого резонансного контуру [118]

Для більш високих гармонік його опір зменшується і ФРК поглинає частину їх потужності. Тому таке включення ФРК не дозволяє розповсюджуватись вищим гармонікам в лінії передачі від генератора контуру, якщо вони там виникають. І навпаки, ФРК не пропускає гармоніки з лінії передачі в контур, у разі їх виникнення (або відбивання) у навантаженні. Ще однією перевагою даної схеми є усунення впливу постійного позитивного потенціалу розподільчого конденсатора C_p на антену. Це важливо тільки для тих експериментів, коли середня точка антени заземлюється. В інших випадках доводиться ставити додатковий конденсатор $C_{p,доп.}$, що розділяє по постійній складовій ФРК та антену. Конструктивно контур складається з індуктивності $L_{фрк}$, утвореної короткозамкненим відрізком фідерної лінії (ВЧ кабель РК 50-13-19) довжиною 2,2 м, який підключений паралельно до конденсатора $C_{фрк}$ ємністю 1000 пФ. Резонансна частота цього контура 5,05 МГц, вона відповідає робочій частоті генератора, а добротність в ненавантаженому стані $Q=1/(\omega \cdot C_{фрк})$ близько 30. Така невисока величина добротності потрібна для того, щоб мати можливість перебудувати автогенератор при різних експериментах в межах порядку 0,1 МГц в обидві сторони без перестроювання ФРК. Використання в ФРК індукції такої конструкції практично не збільшує рівень ВЧ наводок на

зовнішні електричні ланцюги, оскільки всі елементи знаходяться всередині шафи генератора, а сама індуктивність екранована заземленою опліткою ВЧ фідера. Використання ФРК дозволило усунути всі гармоніки вище другої, а друга гармоніка ослаблялася на 5-8 дБ в різних експериментах. Це пояснюється вибраною добротністю контуру ФРК на вході лінії передачі.

У стелараторах Ураган-2М і Ураган-3М використовуються антенні пристрої як симетричні, так і несиметричні (тобто з заземленням одним виводом). Властивості довгої лінії були застосовані при розробці пристрою для підключення несиметричної антени до двотактного виходу генератора. Відомо, що відрізок довгої лінії здовжиною $\lambda/2$ змінює фазу вхідного сигналу часто-на 180° і не трансформує амплітуду. Підключивши такий відрізок ВЧ фідера в одно з плечей двухтактного генератора, до вже наявної лінії передачі ВЧ потужності, створюються умови додаткового перетину фаз, коли при загальному навантаженні потужність від обох плечей сумується.

Для вимірювань у середній точці рамочної антени (вимірюється потенціал антени під час ВЧ імпульсу) також використовувався напівхвильовий трансформатор. При такому підключенні всі вимірювальні датчики та персонал можна розмістити в безпечному віддаленому місці від дії великих магнітних та електричних полів при роботі стеларатора [118,120].

2.6 Створення режиму попередньої іонізації у стелараторі Ураган–3М

При проведенні експериментів з вивчення стартової фази пробою на стелараторі Ураган-3М було помічено відмінність даних експериментів при проведенні повторних вимірювань в однакових режимах. Величина ВЧ напруги початкового ступеня (див. вище-опис ВЧ генератора Каскад) забезпечило збереження мінімальності часу реалізації початкової стадії ВЧ створення плазми. Однак, програмовані ступені анодного модулятора не дають 100% гарантії створення плазми з однаковими параметрами (приблизно кожен 30-й імпульс не дає очікуваного результату), і до того ж

час пробою (Δt) постійно коливається в діапазоні від 3 до 7 мс, що не дозволяє ефективно проводити експериментальну кампанію.

Для усунення цього ефекту було запропоновано здійснити режим попередньої іонізації ВЧ методом. Для цього на стелараторі Ураган-3М був розроблений і створений ВЧ генератор Каскад-0. Він навантажений на малу рамкову антену. Плазма попередньої іонізації створювалася ВЧ магнітним полем від цієї антени. Антена не має електричного контакту з камерою установки. На рисунку 2.20 наведено електричну схему ВЧ джерела для генерації ВЧ поля, призначеного для створення попередньої іонізації на стелараторі Ураган-3М-ВЧ генератора Каскад-0.

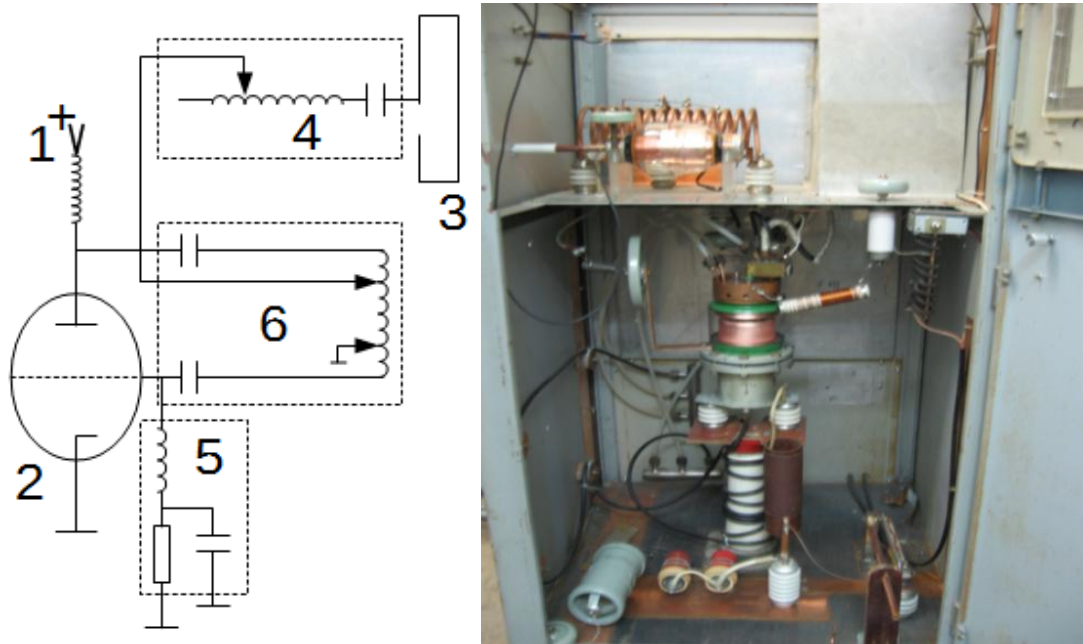


Рис. 2.20 Електрична схема генератора системи попередньої іонізації (ліворуч) і фото генератора Каскад-0 (праворуч). 1-напруга живлення, 2-електронна лампа (триод), 3-антена, 4-пристрій узгодження, 5-ланцюг керуючої сітки, 6-вакуумна система з зворотнім зв'язком [122]

Його зібрано за схемою автогенератора з загальним катодом (рис. 2.19) на вакуумному триоді (2) типу ГУ-4А, з водяним охолодженням анода і сітки. Генератор працює в діапазоні частот 6-8 МГц. Вихідна потужність складає близько 2 кВт. Індуктивність анодного коливального контуру

виконана у вигляді концентрованої індуктивності. Є можливість як плавного регулювання частоти, шляхом зміни ємності контурного конденсатора 6 (не позначено на схемі), так і ступінчатої-шляхом зміни включених витків контурної котушки. Узгодження з навантаженням здійснюється шляхом вибору коефіцієнта трансформації узгоджуючого пристрою 4. В експериментах тривалість ВЧ імпульсу для попередньої іонізації дорівнювала 35 мс.

Конструктивно джерело Каскад-0 виконано у двох шафах. В одній розташована ВЧ частина пристрою - власне автогенератор, а в другій-джерело високої анодної напруги та сітковий і анодний модулятори. Модулятори виконані на основі тиристорних ключів, керованих власним запускаючим пристроєм, який має можливість запускатися зовнішнім сигналом від загальної стійки синхронізації установки.

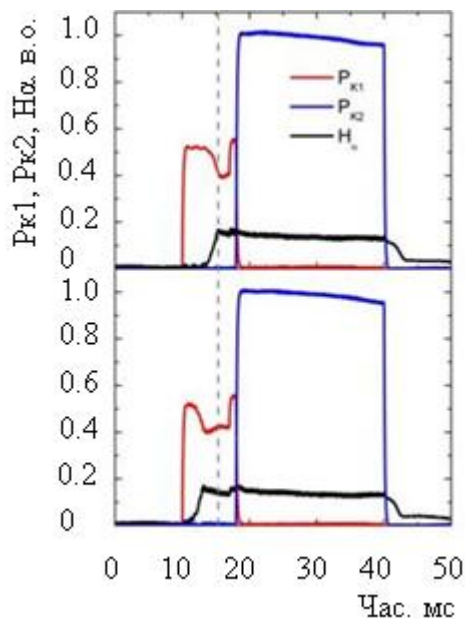


Рис. 2.21. Залежність за часом поведінки лінії H_{α} і потужності ВЧ генераторів Каскад під час дії ВЧ імпульсу: без (вгорі) і з застосуванням малої рамкової антени (внизу) [122]

Для створення плазми попередньої іонізації на установці була задіяна мала рамочна антена ($l=14$ см). Плазма ефективно створюється малою рамочною антенною за умови, що умови затухання Ландау виконані $\omega=k \cdot v_{Te}$,

де k -паралельне (по відношенню до утримуючого магнітного поля) хвильове число, що генерується антеною, v_{Te} -теплова швидкість електронів. Для того, щоб виконати ці умови, паралельна довжина антенних ліній повинна складати приблизно половину довжини хвилі, тобто $L_a \approx \pi v_{Te} / \omega$. Припускаючи, що $v_{Te} \sim 10^8$ см/с, частота генератора Каскад - 0 дорівнює $\omega / 2\pi = 5$ МГц, то довжина антени складає $L_a = 10$ см. Мала рамочна антена виконана з 2 см ширини плоскої смуги і має форму квадрату зі стороною 11 см [122].

На рис. 2.21 наведені залежності за часом поведінки лінії H_α і потужності ВЧ генераторів Каскад під час дії ВЧ імпульсу. Видно, що в режимі попередньої іонізації сигнал H_α стартує раніше, ніж без нього.

Висновки до розділу 2

1. Проведено дослідження впливу плазми на параметри контуру рамкової антени. Виявлено істотну залежність навантаження антенного контура від гвинтового магнітного поля і від величини тиску робочого газу в камері установки. Зі збільшенням струму в обмотках гвинтового поля відбувається зниження навантаження антенного контуру. Із зростанням тиску робочого газу, при постійному магнітному полі, навантаження контуру антени збільшується. У той же час залежність добротності (навантаження) коливального контуру антени Q_a від величини тороїдального магнітного поля при максимальному навантаженні антенного контуру виявилася слабкою.

2. Проведено дослідження струму в рамковій антені від джерела Каскад-1 на стелараторі Ураган-2М. Були виявлені вищі гармоніки основної частоти, що генерується. Також коливання з частотою другого джерела, і навіть різницевої частоти обох генераторів і їх гармонік.

3. Розроблено пристрій, що працює на повній потужності ВЧ джерел Каскад, для усунення гармонік ВЧ струму основної частоти, що виникають у антені при роботі автогенератора на плазмове навантаження.

Експериментально підтверджено відсутність вищих гармонік в спектрі струму в антені при його вживанні. Придушення високих гармонік дозволило підвищити точність вимірювань ВЧ потужності, що вводиться в антену.

4. Для створення і нагріву плазми модифіковані потужні ВЧ джерела електро-магнітних полів, Каскад-1 і Каскад-2, що працюють в імпульсному режимі. Двотактна схема ВЧ автогенераторів містить мінімум конструктивних елементів і забезпечує необхідну потужність в навантаженні (порядка 1 МВт) при мінімумі елементів, що свідчить про ефективність її роботи. Обслуговування та ремонт таких пристроїв спрощується. Навантаженням генераторів можуть служити антенні пристрої різної конструкції і величини власної індуктивності. Розроблено різні пристрої, що узгоджують, які забезпечують підключення як симетричної конструкції антени (яка не має електричного контакту з вакуумною камерою стеларатора), так і несиметричної.

5. Створене додаткове обладнання для налаштування і перемикання потужного ВЧ обладнання, це фідерний ВЧ перемикач і потужне ВЧ широкополосне баластне навантаження.

6. Режим попередньої іонізації забезпечив підвищення повторюваності параметрів плазми. Розроблено імпульсне малопотужне джерело ВЧ поля, генератор К-0, для реалізації режиму попередньої іонізації на стелараторі Ураган-3М. Зібраний за схемою автогенератора із загальним катодом.

Результати досліджень даного розділу наведено у публікаціях здобувача [103], [106], [107], [109], [115], [116], [117], [118], [119].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ОЧИЩЕННЯ ВАКУУМНОЇ КАМЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ КРІОГЕННОЇ ПАСТКИ

3.1 Спосіб оцінки динаміки процесу очищення вакуумної камери

Для оцінки ефективності очищення вакуумної камери був розроблений спеціальний оперативний спосіб. Як було зазначено вище, одною з головних перешкод на шляху отримання плазми з високою температурою та густиною є потоки легких та важких домішок у плазмі. Джерелами таких домішок, як правило, є газовиділення зі стінок вакуумної камери, а також ерозія стінки при взаємодії з плазмою. Легкі домішки-це сполуки вуглецю, кисню та інших газів, а важкі домішки визначаються складом матеріалу стінки вакуумної камери [123]. Забруднена вакуумна камера створює загальне газове навантаження на порядок вище, ніж газові виходи зі стінки очищеної вакуумної поверхні. Основними причинами забруднень вакуумної камери вважаються випадки технологічного розкриття камер для проведення робіт при атмосферному тиску. Тому очистка поверхні стінки вакуумних камер термоядерних установок є обов'язковим технологічним процесом при підготовці до проведення експериментів зі створення плазми. Ефективне очищення поверхонь сприяє досягненню максимальних параметрів плазми.

Кріогенні вловлювачі є елементом кріоконденсаційної відкачки в вакуумних системах. Швидкість конденсації можна визначити за формулою $G_c = \gamma \cdot p \cdot \sqrt{M / (2\pi \cdot R \cdot T)}$, де γ -вірогідність конденсації молекули газу, що взаємодіє з поверхнею твердого тіла, p -тиск газу, M -молярна маса, R -універсальна газова постійна, T -температура газу. Швидкість ж випаровування $G_e = \gamma \cdot p_{svT} \cdot \sqrt{M / (2\pi \cdot R \cdot T)}$, де p_{svT} -тиск насичених парів газу при температурі T . Якщо взяти відношення швидкості конденсації G_c до швидкості випаровування G_e , то отримуємо умову для конденсації газів на

поверхню. Це означає, що застосування кріоконденсаційної відкачки можливо за умови, що тиск викачуваного газу в вакуумній камері вище тиску його насичених парів p_{SVT} . Наприклад, для окису вуглецю CO при температурі 51 К, тиск p_{SVT} становить близько 133 Па, а тиск у камері при проведенні очищення-близько $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Відповідно, умова конденсації C для цього газу при температурі рідкого азоту не виконується, оскільки в цьому випадку $C < 1$. А для вуглекислого газу CO₂ тиск p_{SVT} при азотних температурах складає менше $1,3 \cdot 10^{-6}$ Па. У цьому випадку відношення швидкості конденсації G_c до швидкості випаровування G_e більше одиниці і конденсація відбувається.

Відомо, що при здійсненні ВЧ очищення вакуумних камер термоядерних установок, до складу відкачуваних газів входять CO, H₂, H₂O, CH₄ та інші вуглеводні. [124]. Умова для кріоконденсації виконується практично для всіх цих газів. Тому, якщо в вакуумному просторі камери стеларатора або токамака розмістити пастку, що охолоджується рідким азотом, то при проведенні очищення плазмовим розрядом певна частина цих газів буде конденсуватися на її поверхні [125]. Для оцінки кількості виділеного газу в вакуумній камері установки в процесі плазмового очищення на стелараторі Ураган-2М використовується розроблений метод діагностики, який ґрунтується на властивості кріогенної пастки, конденсувати на своїй поверхні гази, що утворюються в камері під час очищення [126]. Пастка розміщена в одному з патрубків системи, що відкачує перед турбомолекулярним насосом. Відомо, що при застосуванні методу кріолокаційного захвату в маспектрометрії (STAMS-cryo-trapping assisted mass spectrometry), також використовується кріогенна пастка для конденсації досліджуваного газу. Однак, при цьому методі, після процесу конденсації настає поступове довготривале нагрівання уловлювачів, щоб провести вимірювання тиску окремих масових груп газів, тому знати склад газу, що утворився в процесі чистки, важливо [127]. На цьому етапі точність, яка отримана завдяки накопиченню за час конденсації на поверхні пасток суміші

газів, цілком прийнятна. Вона істотно вище, ніж у випадку вимірювання газу безпосередньо з камери. А короткі проміжки часу, витрачені на проведення конденсації газу та нагріванню пастки, дозволяють підвищити оперативність проведених вимірювань для внесення корективів у процес очищення вакуумної камери установки [128].

Суть методу визначення ефективності очистки стінок вакуумної камери полягає в наступному. У процесі виконання ВЧ очищення в вакуумній камері постійно утворюється газова суміш. Як вже говорилося вище, у вхідному патрубці одного з відкачуючих насосів розміщена кріогенна пастка, на охолодженій поверхні якої відбувається конденсація газів, що відкачуються цим насосом з вакуумної камери (рис. 3.1).

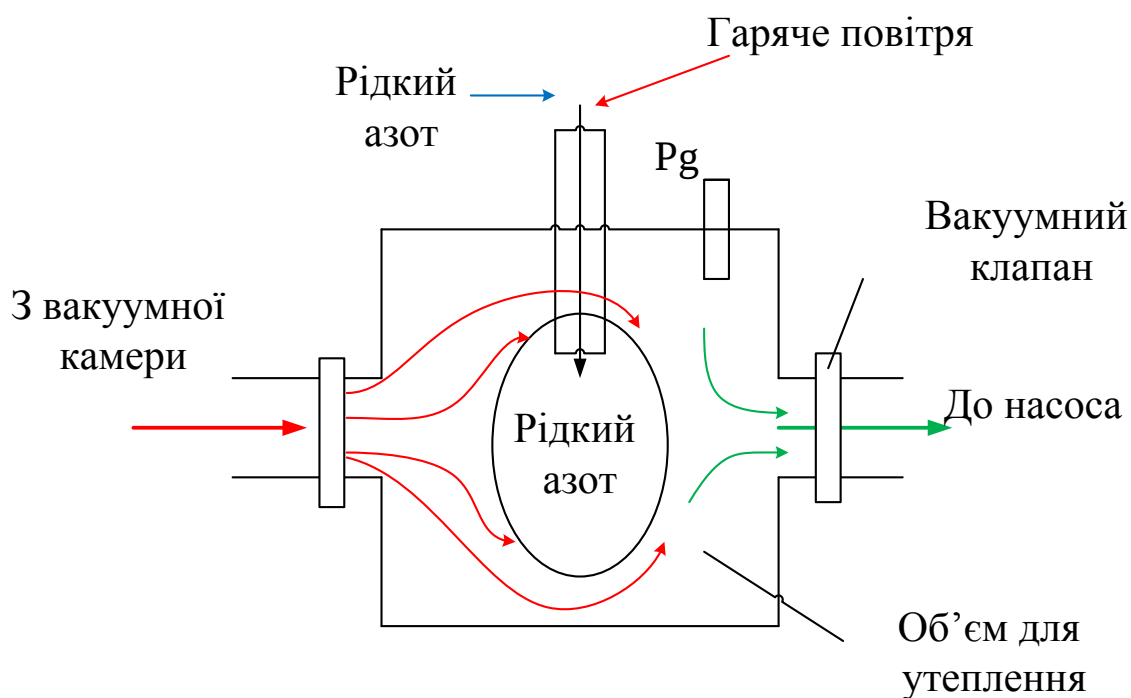


Рис. 3.1 Схематичне зображення роботи способу оцінки динаміки процесу очищення вакуумної камери за допомогою вимірювальної пастки [132]

Якщо зафіксувати час конденсації, то при всіх інших незмінних умовах кількість зконденсованного газу буде залежати від кількості, утвореного в процесі очищення газу. З закону Авогадро або з рівняння Менделєєва-Клапейрона випливає, що в замкнутому об'ємі при постійній температурі величина тиску визначається кількістю газу, що знаходиться в ньому. Для

того, щоб визначити кількість зконденсованого газу, пастка відсікається вакуумними клапанами з обох сторін від камери та від насоса.

Таким чином створюється замкнений об'єм фіксованої величини. Об'єм камери пастки з патрубками, що відводять, на установці Ураган-2М становить близько 52 л, (об'єм камери самої пастки-32,5 л), об'єм камери охолоджувача-2.7 л, площа поверхні, на якій відбувається конденсація~0,105 м². Після того, як камера відсікається від насоса та вакуумної камери, нарів кріогенної пастки здійснюється за допомогою прокачки через внутрішній об'єм пастки гарячого повітря. В результаті чого, сконденсована на зовнішній поверхні, газова суміш випаровується і залишається в замкнутому об'ємі, що призводить до підвищенню тиску в камері пастки. Максимальна величина температури нагріву визначається конструкцією вакуумної системи та кріогенної пастки. Другий етап нагрівання пастки, також триває строго певний час, що дозволяє досягти нагрівання пастки до однієї температури при проведенні різних вимірів. У фіксованому об'ємі постійно вимірюється тиск газової суміші після нагріву пастки- P_g . Час закінчення онагріву визначається зупиненням збільшення значення тиску в камері пастки. В наших експериментах він складав від 10 до 20 хвилин. За величиною тиску P_g в фіксованному об'ємі після нагріву пастки можна зробити висновок про кількість газу, зконденсованого на пастці в процесі ВЧ очищення вакуумної камери стеларатора, що дозволяє побічно, але досить точно, визначити кількість утвореного газу всередині камери при проведенні очищення. Таким чином, можна здійснювати оцінку ефективності процесу очищення. [127, 128]. Відомо, що існує виділення газів через стінки вакуумної камери при тиску нижче атмосферного, в подальшому-фонове газове виділення. Тому для визначення кількості газу, утвореного в камері установки в процесі очищення, необхідно виміряти величину P_g для випадку фонового газового виділення при робочому тиску. Після цього проводиться вимірювання P_g під час проведення очищення. Різниця між цими величинами показує, на скільки збільшується

газоутворення в камері в порівнянні з фоновим газовим виходом. Тривалість експозиції, тобто час конденсації газу на охолоджену поверхню, підбирають з міркувань забезпечення більшої точності вимірювання тиску P_g . Однак, занадто зменшити час експозиції не можна, тому що короточасні зміни параметрів розряду, що очищує, можуть істотно впливати на отримані результати.

Конкретна конструкція вимірювальної кріогенної пастки показана на рис. 3.2. Робота здійснюється в такий спосіб. Щоб виміряти кількість газу після нагрівання, пастка відсікається вакуумними клапанами 2 і 4 з обох сторін від камери та від насоса.

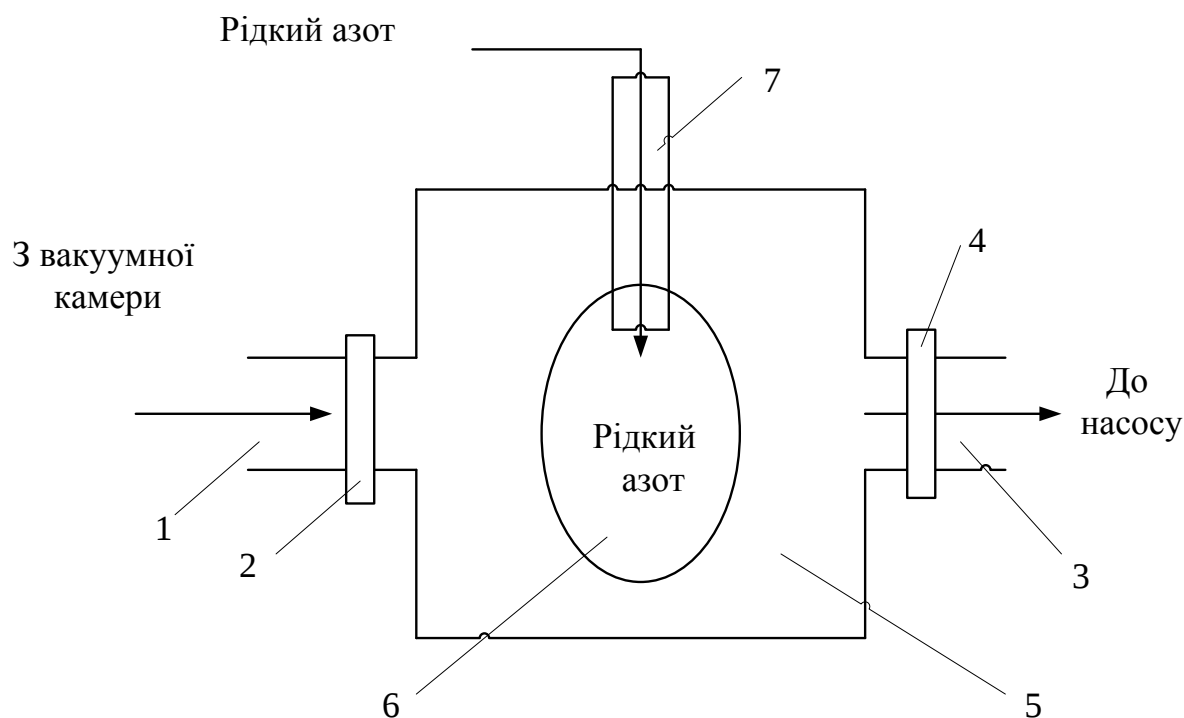


Рис. 3.2 Облаштування кріогенної вимірювальної пастки на стелараторі Ураган-2М. 1-трубопровід з камери. 2-вакуумний клапан №1. 3-трубопровід до насоса. 4-вакуумний клапан №2. 5-відокремлений об'єм, в якому вимірюється тиск P_g , 6-ємність для кріогенної рідини на поверхні якої конденсуються відкачувані гази. 7-трубка для введення кріогенної рідини 8.- датчик тиску P_g [133]

Цим самим формується замкнений об'єм 5 фіксованої величини. І потім, в цьому замкненому об'ємі, здійснюється нагрів кріогенної пастки. В цьому ж об'ємі, зконденсована на зовнішній поверхні пастки, газова суміш випаровується. Нагрівання проводять у два етапи: спочатку видаляється рідкий азот із внутрішнього об'єму порожнини 6, а потім в нього прокачується підігріте до певної температури повітря через трубку 7. У об'ємі 5 постійно вимірюється тиск отопленої газової суміші- P_g . За ступенем росту температури поверхні пастки 6 в результаті випаровування конденсату в відсіченому об'ємі 5 збільшується тиск. За величиною тиску P_g в цьому об'ємі після нагрівання пастки можна зробити висновок про кількість відкачуваного газу, що виділяється в камері і-тобто про ефективність чи динаміку процесу очищення [129].

3.2 Джерело УКХ поля для чищення вакуумної камери безперервним розрядом на частоті вище за ЩР

Конструкція генератора розроблена таким чином, щоб стійка ВЧ частини генератора була розташована в районі антенного введення в камеру Ураган - 2М. А стійки високовольтного випрямляча, силового трансформатора та регулятора напруги знаходились би в зоні роботи обслуговуючого персоналу.

Генератор УКХ зконструйований на лампі ГУ-4А (рис. 3.3). Ця лампа - потужний вакуумний триод, призначений для генерації ВЧ коливань в діапазоні до 600 МГц, її технічні характеристики наведені в [130]. Діапазон робочих частот-125÷140 МГц. Вихідна потужність-близько 4 кВт.

Сучасні генераторні лампи мають таку особливість конструкції, що у них високе значення індуктивності лише одного з виводів, зазвичай це катод, а індуктивності сіткового та анодного виводів зневажливо малі. У лампи ГУ - 4А мінімальна індуктивність сіткового виводу. Тому в конструкції генератора і застосовується схема автогенератора з загальною сіткою (рис.

3.3). Заземлення сіткового виводу лампи в схемі з загальною сіткою дозволяє зменшити паразитну індуктивність під час монтажу. Катодне відведення неможна заземлювати, оскільки індуктивність цього виводу має значну величину [131]. Зворотній зв'язок здійснюється через міжелектродну ємність анод-катод. Зі зростанням частоти підвищуються втрати енергії на випромінювання, втрати в різних діелектричних деталях конструкції коливального контуру, втрати в з'єднувальних проводах за рахунок скін-ефекту. Також збільшується індуктивний опір всіх провідників та виводів лампи.

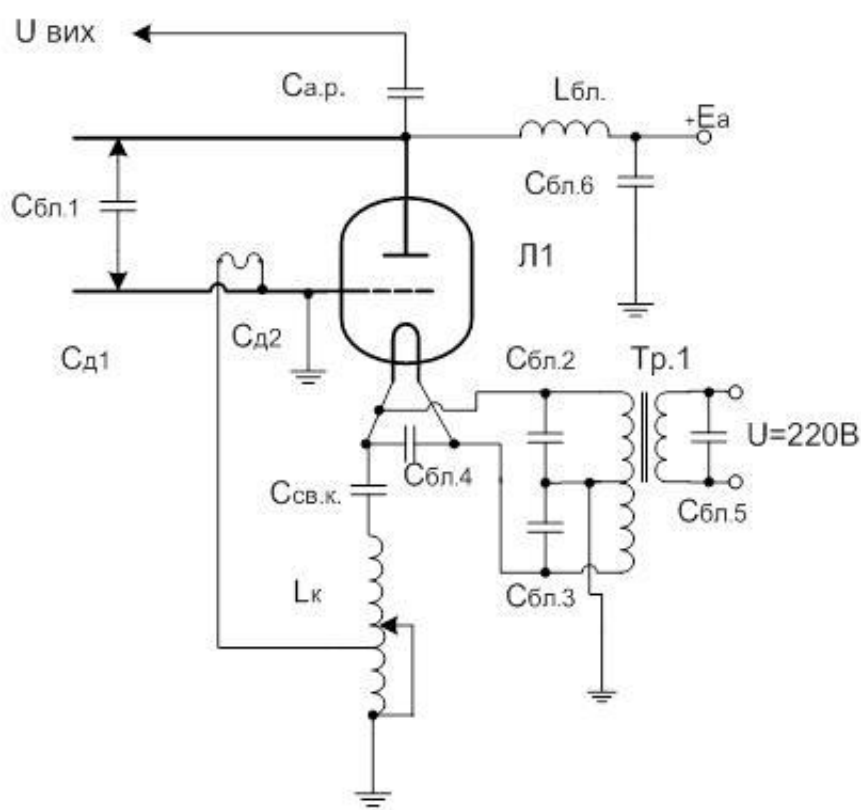


Рис. 3.3 Принципова електрична схема генератора УКХ [132]

Тому в генераторі об'єднана резонансна система і лампа в єдиний конструктивний вузол (рис 2.8). Так як робоча частота досить висока 130 МГц (довжина хвилі становить 2,27 м), для зменшення впливу різних паразитних реактивностей монтажу, конструкція ВЧ індуктивності була

виконана на основі, так званого, жорсткого (повітряного) коаксіала. Анодно - сітковий коливальний контур утворюється замкнутою коаксіальною лінією (поз.1 та 2 рис. 2.8), закороченою рухомим поршнем 3 і навантаженою на внутрішню ємність анод - сітка лампи Л1 (ємність анод- сітка складає 35 пФ) і монтажну ємність анод - корпус генератора.

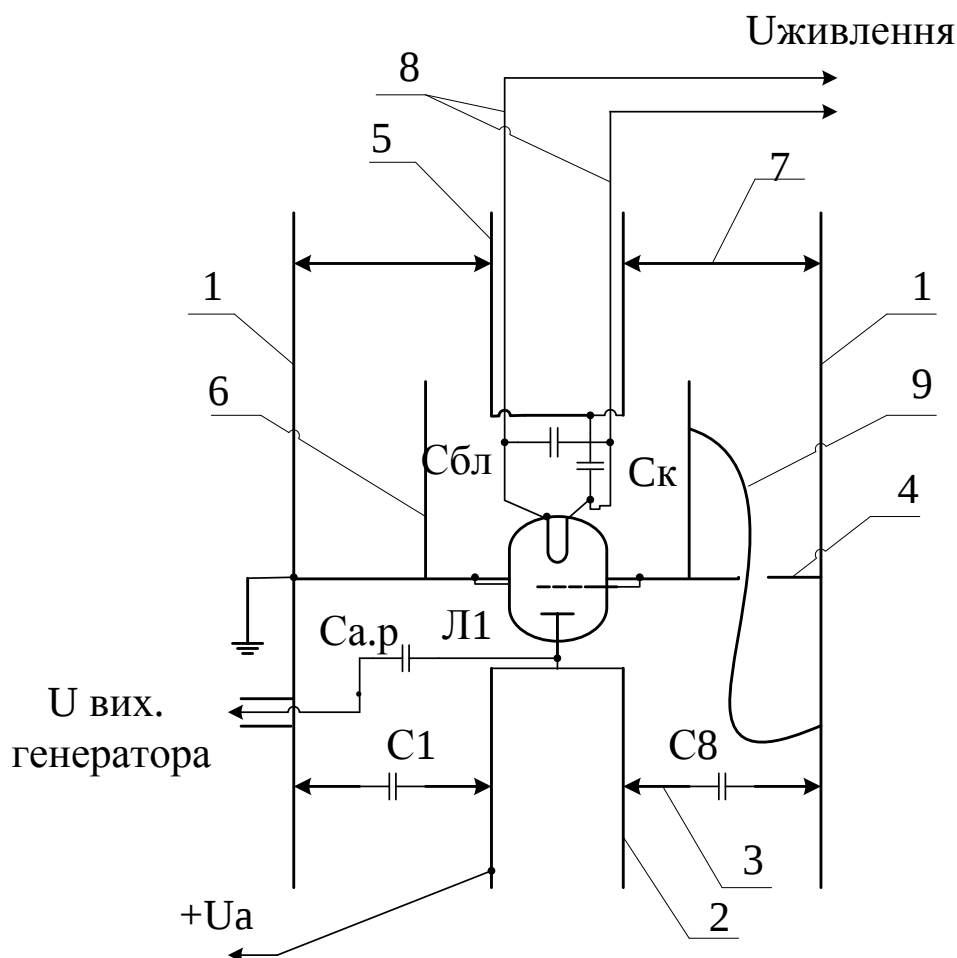


Рис. 3.4 Схематичне зображення конструкції генератора УКХ [132]

Конструктивно-індуктивність є порожнім мідним циліндром 1, з внутрішнім провідником 2 (рис. 3.4), у середині якого розташований поршень 3, який може переміщатися по поверхні циліндра. Зовнішній діаметр анодно-сіткової фідерної лінії D дорівнює 310 мм, діаметр внутрішнього провідника $d=145$ мм, при довжині лінії 400 мм. Довжина розрахована по формулі $l = \lambda / 2\pi \cdot \arctg \frac{1}{\rho \cdot \omega \cdot C}$, де λ -довжина хвилі коливань, що генеруються, ρ - хвильовий опір довгої лінії, ω -частота генератора, C -

ємність, на яку навантажена довга лінія, у нашому випадку—це ємність анод-сітка лампи плюс паразитна ємність монтажу. Хвильовий опір такої лінії дорівнює $\rho = 60 / \sqrt{\varepsilon} \cdot \ln \frac{D}{d}$. Для нашого випадку $\rho = 45,5$ Ом, що практично дорівнює хвильовому опору фідерної лінії передачі ВЧ енергії від генератора в антену.

Максимальну величину індуктивності визначаємо, знайшовши погонну індуктивність, яка розраховується за формулою $L = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot \mu \cdot \lg(D/d)$, де L —мікрогенрі на сантиметр. При довжині лінії 40 см, максимальна індуктивність дорівнює $L_{\max} = 0,06$ мкГн. При перемещенні поршня змінюється величина індуктивності коаксіальної лінії, що призводить до зміни частоти коливань що генеруються. На поршні при використанні фторопластових ізоляторів закріплені 8 блокуючих конденсаторів $C_{\text{бл.1}}$ (рис 2.8) загальною ємністю 8000 пФ. Для частоти в 132 МГц опір цих конденсаторів складає $0,1 \cdot 10^{-3}$ Ом, що практично можна вважати коротким замиканням. Для забезпечення надійного електричного контакту поршня і стінки циліндрів, що утворюють коаксіальну лінію, виводи поршня забезпечені пружинними контактами з фосфористої бронзи. Такі контакти забезпечують малий перехідний опір, який практично не змінюється в процесі експлуатації.

Величина зворотнього зв'язку регулюється підбором відстані між анодним циліндром (виводом) і поверхнею полос ОС, а також їх кількістю, тобто зміною коефіцієнта магнітного зв'язку. Плавне регулювання зворотнього зв'язку в катодному ланцюзі здійснюється шляхом зміни величини катодної індуктивності, за допомогою руху закриваючого поршня 7 всередині конструкції коаксіальної лінії. Вона також виконана у вигляді жорсткої повітряної коаксіальної лінії. Наружний діаметр її так само, як і в анодній лінії $D = 320$ мм (поз. 1, рис.2.8). Діаметр внутрішнього провідника $d = 100$ мм (поз. 5). В середній частині конструкції між циліндрами, що утворюють змінну катодну індуктивність, розташовується катодно-сітковий дросель 6. Він виконаний у вигляді мідного циліндра з діаметром 200 мм. До

нього кріпляться виведення смуг зворотного зв'язку. Катодний і анодний зовнішні циліндри розділені бронзовим фланцем 4, до якого кріпиться лампа, сітковим виведенням. У цьому фланці зроблені спеціальні отвори, края яких заізолювані фторопластовими екранами для полос зворотнього зв'язку 9. Всередині фланця також знаходяться труби водяного охолодження сіткового виведення у лампи.

Для підведення живлення лампи через внутрішній циліндр катодної індуктивності пропущені жорсткі струмопідводи до виводів напруги у лампи. До них кріплять гнучкі (виготовлені з дроту марки ПЩ) дроти 8 від трансформатора напруги Тр. 1 (рис. 2.8), які розташовані в рукаві охолоджуючого вентилятора (по схемі не показано). Анодне живлення від стійки високовольтного випрямляча підключено через фільтр, що складається з дроселя $L_{\text{бл.}}$ і ємності $C_{\text{бл.3}}$, до анодного виведення анодно - сіткової індуктивності 2.

Відбір ВЧ потужності у навантаження відбувається з анодного контура через розділювальний конденсатор $C_{\text{а.р.}}$. Він розташований у середині анодного резонатора. Вихідна напруга генератора знімається через коаксіальний вивід, влаштований на бічній поверхні резонатора. Конденсатор $C_{\text{а.р.}}$ одночасно є і елементом узгодження анодного контура з навантаженою фідерною лінією передачі. Величина його змінювалася при різних режимах роботи генератора від 50 до 150 пФ, при цьому його опір змінювався в діапазоні 25 – 70 Ом. Лінія передачі ВЧ енергії в антену в різних режимах складалася з 1 або 2-х ВЧ фідерів РК-50-19, включених паралельно, тобто її хвильовий опір дорівнював 50 або 25 Ом. На виході генератора встановлений спрямований відгалужувач (СВ) для вимірювання потужностей падаючої та відбитої хвилі. Сигнал від прийомних пластин СВ подається на вхід детектора через перемикач, що дозволяє по черзі підключити до входу детектора сигнали падаючої або відбитої хвилі. З виходу детектора випрямлений і посилений сигнал подається на вимірювальний прилад, що показує напругу, пропорційну напрузі відповідної хвилі, що поширюється в лінії передачі ВЧ

потужності. Для охолодження анода і сітки лампи генератора, що працює в безперервному режимі, була застосована схема охолодження за допомогою води. Ланцюг живлення і катодні ланцюги охолоджуються повітряним потоком від вентилятора, встановленого зверху генераторної стійки. Рівень напруги живлення встановлюється вручну за допомогою автотрансформатора, включеного в ланцюг живлення. При цьому ця напруга встановлюється в два етапи: спочатку подавалося 70% від номінальної напруги живлення з витримкою в 10 секунд, а потім подавалась повна напруга живлення теж з витримкою в 10 секунд. Це необхідне для забезпечення прогрівання ниток катоду лампи із зниженим струмом, так як в холодному стані їх опір значно менше, ніж в гарячому. І при включенні повної напруги в перший момент часу через ланцюг протікає підвищений струм, який може привести до виходу з ладу лампи. Енергетичний режим роботи генератора контролюється за рівнем катодного струму лампи. Його величина при різних режимах створення плазми змінюється в межах від 0,8 до 2,7 А при зміні анодної напруги від 3-х до 5 кВ [132].

3.3 Вимір динаміки очищення УКХ безперервним розрядом в стелараторі Ураган-2М

Перші експерименти з застосуванням діагностики з кріогенною пасткою наведено в [127,128]. На першому етапі експериментів проведено перевірку працездатності способу для конкретних умов установки. А також визначення чутливості даного способу.

Експериментальним шляхом, змінюючи час "експозиції" (тобто час конденсації відкачуваної газової суміші на охолоджену поверхню кріогенної пастки), домагалися отримання величин тиску P_g , що не перевищують 66,5 Па. Тиск вимірювався прибором ВІТ-3, а вибрана величина тиску обумовлена поточними можливостями приладу. Експерименти показали, що дана методика дозволяє стежити за змінами тиску P_g в процесі очищення

камери стеларатору. Причому, час конденсації повинен бути близько 1 години, як для УКХ, так і для СВЧ режимів створення плазових розрядів на даному етапі експериментів. Час-одна година був обраний для подальших експериментів.

Цим же методом був виміряний тиск P_g в разі фонового газовиділення стінки камери у процесі напускання водню у вакуумну камеру стеларатора. Значення P_g при цьому рівно 0,4 Па, що практично на три порядки менше, ніж при різних умовах ВЧ очищення. Тобто, у процесі ВЧ очищення в даному режимі в камері виділяється приблизно в тисячу разів більше газу, ніж фонове значення газовиділення, що дозволяє не враховувати цю величину при подальших вимірюваннях.

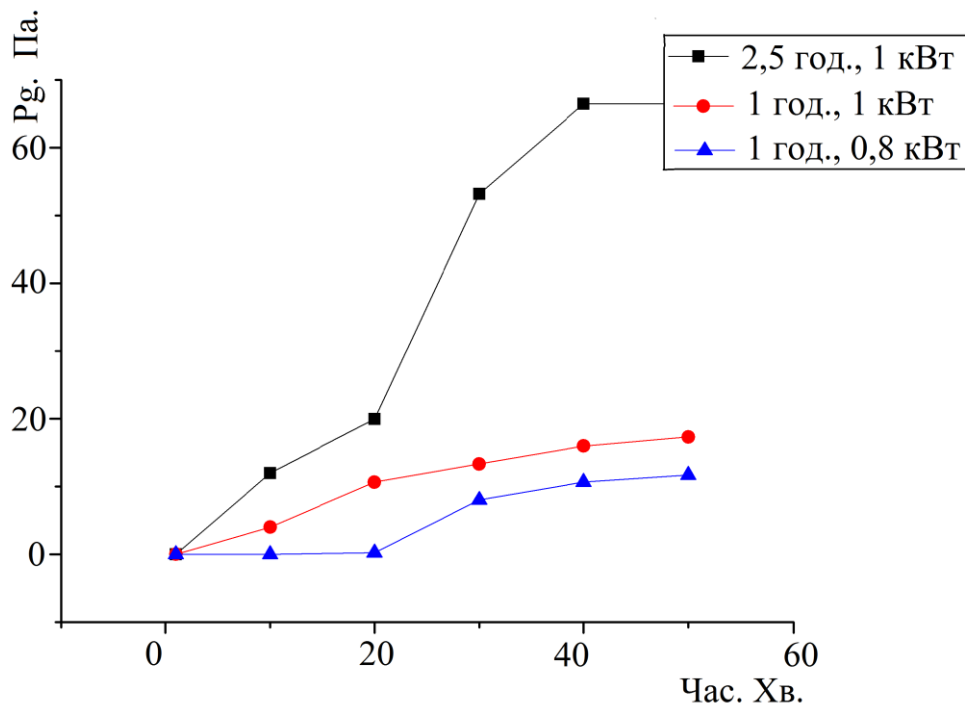


Рис. 3.5 Залежність тиску P_g в замкнутому об'ємі після її нагрівання [127]

На рис. 3.5 показана залежність тиску P_g газу в замкнутому об'ємі пастки після її нагрівання. Помітна залежність величини P_g від вихідної потужності генератора.

На графіку видно, що чим вище потужність генератора при однаковому часі конденсації-тим більше величина тиску P_g (рис. 2.5 синя та червона

смуги). І явно видно збільшення величини P_g при збільшенні часу конденсації (чорна смуга). По змінах P_g можна зробити висновок про кількість відкачуваного газу з вакуумної камери установки, тобто про ефективність методу очищення установки. Якщо з часом загальної очистки кількість відкачуваного газу (величина P_g) зменшується, то це може означати, що при збереженні постійності параметрів розряду, у камері виділяється менша кількість газової суміші.

На стелараторі Ураган-2М було проведено 100-годинне очищення квазібезперервним УКХ розрядом в тороїдальному магнітному полі $B=0,075$ Тл та при значенні тиску робочого газу (водень) $P_{H_2} = 26,6 \cdot 10^{-3}$ Па [140].

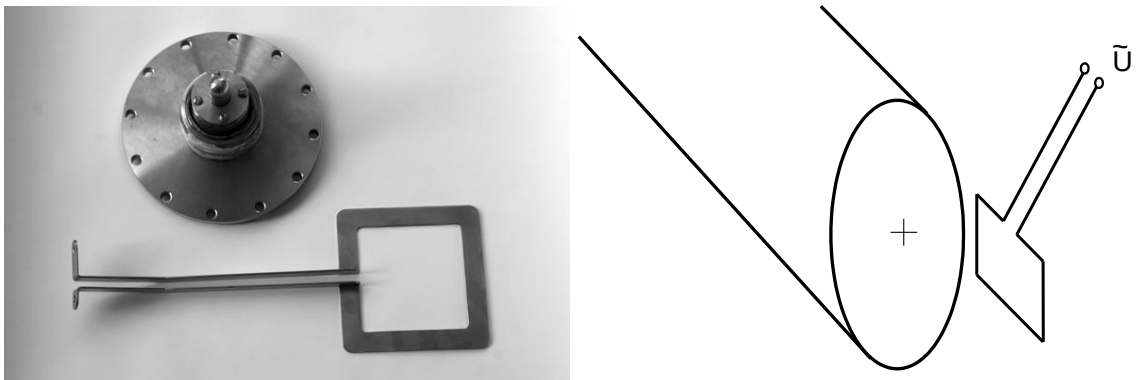


Рис. 3.6 Мала рамкова антена(ліворуч) і ескіз, що ілюструє положення антени відносно плазмового шнуру (праворуч) [134].

Джерелом ВЧ потужності був генератор УКХ, опис якого надано в другому розділі дисертації. Генератор був навантажений на спеціальну антену невеликого розміру (рис 3.6). 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. Зондові вимірювання дають значення густини плазми $n_e \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, електронна температура змінюється в діапазоні $T_e = 3 \div 10 \text{ eV}$.

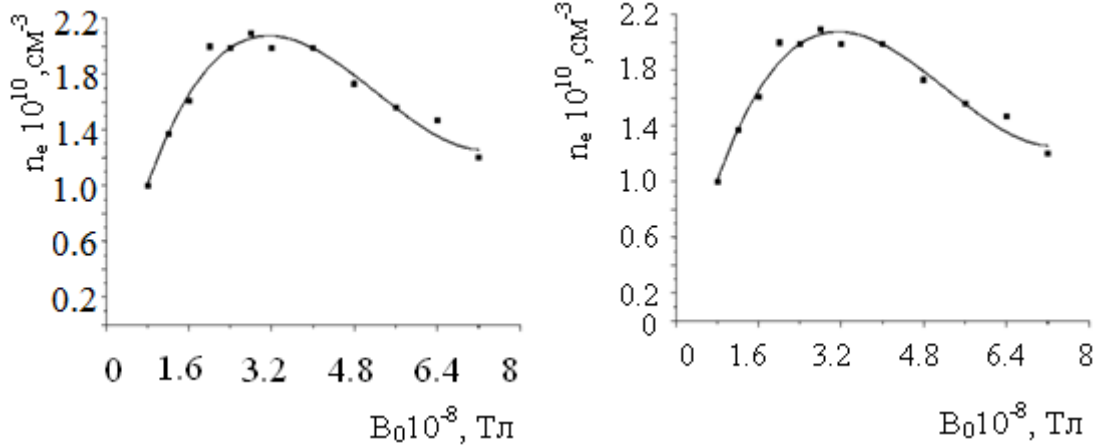


Рис. 3.7 Залежність густини і температури електронів в УКХ розряді від напруженості магнітного поля [134]

Були оброблені вольт-амперні характеристики, отримані при фіксованому положенні зонда $r = 8$ см в ширшому діапазоні напруженостей магнітного поля B_0 в діапазоні магнітних полів $(1.6 - 8) \cdot 10^{-8}$ Тл. З рис. 3.7 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 $n_e \sim 2 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$).

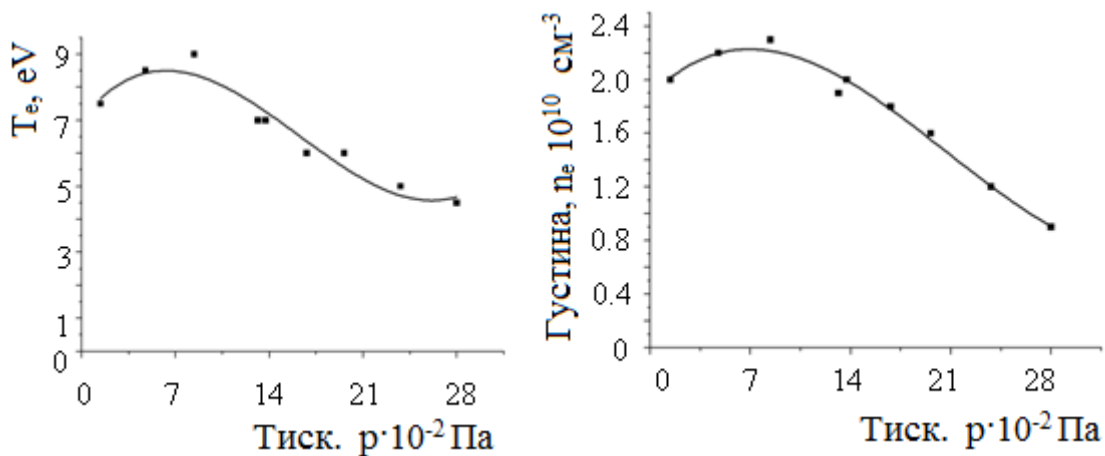


Рис. 3.8 Залежність температури електронів і густини від тиску водню [134]

Щоб отримати уявлення про вплив на параметри плазми, що чистить, тиску водню p у вакуумній камері, були виміряні вольт-амперні

характеристики при постійних радіусі $r = 10$ см і величині магнітного поля $B_0 = 6,8 \cdot 10^{-8}$ Тл для різних значень p (рис. 3.8).

Максимуми температури (9 еВ) і щільності ($\sim 2\text{--}2,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$) мають місце при тиску 0,08 Па, проте в цілому зміни T_i і n_e в розглянутому діапазоні тисків (0,013–0,27) Па, незначні.

Значення температури зондових вимірювань узгоджуються з результатами оптичної діагностики. Такі параметри розряду сприятливі для очищення стінки в атмосфері водню. Розряд є великим: плазма займає весь об'єм утримання і навіть виходить на край. Параметри розряду не виявили ніякої чутливої залежності від умов розряду, тобто від тиску нейтрального газу і величини тороїдального магнітного поля. Масова спектрометрія залишкового газу вказує на ефект очищення стінки протягом 100 годин.

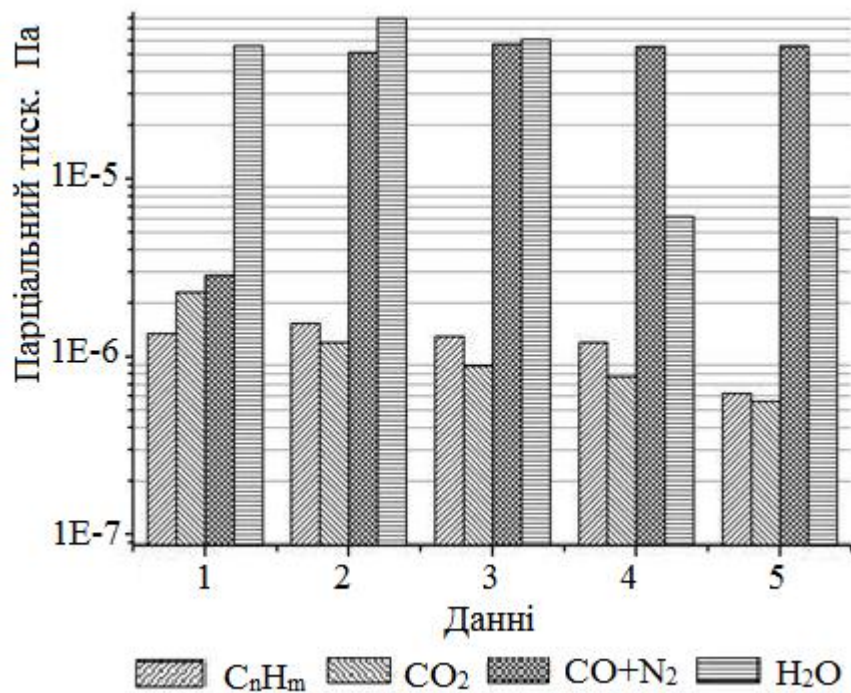


Рис. 3.9 Парціальні тиски залишкового газу по дням очищення [134]

Еволюція парціальних тисків залишкового газу представлена на рис. 3.9. Тут показано зменшення оксиду вуглецю (CO_2) з часом, деяке збільшення з

початку після стабільного зниження вмісту вуглеводнів (C_nH_m) і деяке зниження вмісту води (H_2O).

Лінії N_2 постійні внаслідок витоків у вакуумній камері, яка забезпечує головним чином азот і кисень (останній швидко перетворюється у воду). Начальне збільшення C_nH_m і H_2O пояснюється недосконалістю насосної системи Ураган-2М, яка починає повну швидкість тільки з середини експерименту [133].

Експерименти показують, що використовувана рамочна антена не оптимальна для такого розряду УКХ: його опір навантаження занадто малий для забезпечення зручного електричного узгодження. Для подальших експериментів була розроблена нова охолоджувана антена (рис. 3.10). Такий розряд можна використовувати при високих магнітних полях. Ця функція корисна для стаціонарних надпровідних машин.

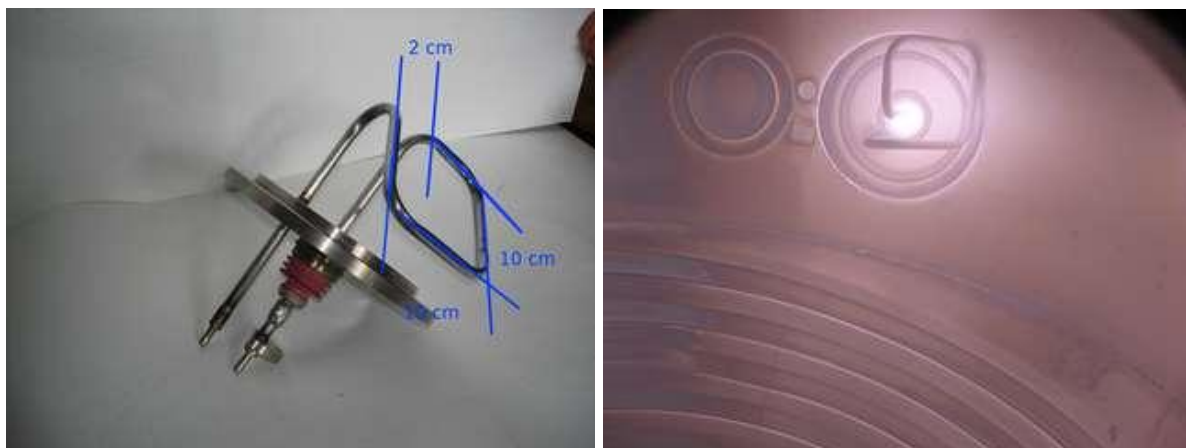


Рис. 3.10 Фото охолоджувальної малої рамкової антени (зліва) і розряд, створюваний за її допомогою (праворуч) [136]

3.4 Поєднання безперервного УКХ розряду на частоті вище ІЦР з іншими видами розрядів для очищення

Для очищення вакуумної камери на установці Ураган-2М були проведені експерименти із застосуванням безперервного розряду на частоті вище ІЦР у поєднанні з іншими видами розрядів (ІЦР). Реалізовувався, так

званий, режим багатоступінчастого очищення. На першому етапі було здійснено прогрів стінки вакуумної камери. Оскільки в її конструкції використовуються гумові ущільнення, які не витримують високу температуру, тому температура нагрівання стінки не повинна була перевищувати 70 градусів Цельсія. Стінки камери і патрубки відкачування системи, що ведуть від камери до насосів, нагрівалися до температури 60-65 градусів Цельсія безперервно протягом трьох днів. Потім, на другому етапі, одночасно з нагріванням, виконувалося очищення вакуумної камери безперервним розрядом із застосуванням УКХ генератора ($f_g=132$ МГц) потужністю близько 2 кВт спільно з НВЧ генератором ($f_g=2,4$ ГГц), який створював плазму. На третьому етапі одночасно з безперервним УКХ розрядом був включений імпульсний ВЧ генератор Каскад-1, що реалізує ВЧ очищення за допомогою іонно-циклотронного резонансу, тобто використано одночасно хімічний та фізичний способи очищення стінки камери.

Теоретичне обґрунтування режиму очищення безперервним розрядом із застосуванням УКХ генератора наведено в роботі [134].

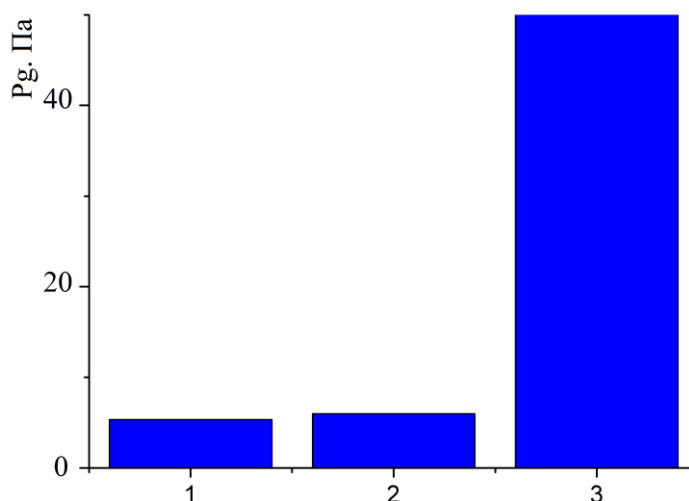


Рис. 3.11 Зміна тиску P_g (визначаємого кількістю конденсату на поверхні пастки) при нагріванні камери (експозиція 1 година): 1-через 3 години після початку нагрівання, 2-через 6 годин, 3-через 24 години [133].

ВЧ очищення проводилась УКХ генератором, також датково включався другий генератор з безперервною генерацією на частоті 4,7 МГц, потужністю близько 1 кВт. Обидва генератора працювали в безперервному режимі при постійному магнітному полі $B = 0.03 \dots 0.05$ Тл.

Ефективність очищення вакуумної камери визначалася описаним вище способом із застосуванням кріогенної пастки. На рис. 3.11. показана зміна тиску P_g , який є пропорційним кількості відкачуваного газу, при прогріванні камери.

Оскільки подібні вимірювання проводилися вперше, було невідомо з яким часовим інтервалом їх проводити. Тому часовий момент початку газовиділення з стінки камери не був зафіксований. Перші два вимірювання через 3 і 6 годин дали практично однаковий результат, приблизно рівний фоновому значенню. Це означає, що за 6 годин безперервного нагрівання, газовиділення стінки камери ще не прогрілися до порога початку газовиділення, оскільки теплоємність стінки камери дуже висока.

Вимірювання, яке проведене через 24 години після початку прогрівання, дало значення $P_g = 53,2$ Па. Тобто після 24 години прогрівання газовиділення зі стінки камери вже було зафіксовано. У наших вимірюваннях це максимальне значення тиску. Воно дуже близьке до максимально можливого для вимірювальної системи, що використовується. Тому, при проведенні подальших вимірювань довелося зменшити час експозиції (конденсації). Якщо в перших експериментах цей час дорівнював 60 хвилинам, то в подальшому конденсація здійснювалася протягом 30 хвилин.

На рис. 3.12, який є продовженням рисунку 3.11, видно тенденцію до зменшення кількості зконденсованого газу протягом двох днів нагрівання стінки камери.

Одразу ж помітне різке зниження значення P_g , в порівнянні з попереднім графіком. Від 53,2 Па до 5,85 Па. Друге вимірювання вже робилося при експозиції 30 хвилин, тобто, у два рази коротше. Однак, якщо застосувати лінійну апроксимацію - то отримаємо значення $P_g = 11,7$ Па, що в

5 разів менш, ніж вимірювання, яке проведе через 24 години після початку прогрівання стінок камери. За три години значення P_g впало у 5 разів

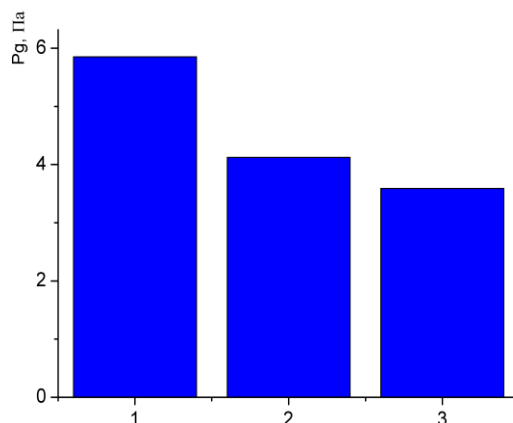


Рис. 3.12 Результати ВЧ очищення за другий день прогрівання камери (експозиція 30 хв): стовпець 1-через 27 годин після початку прогрівання, 2-через 28, 3-через 30 [133].

Тому, можна припустити, що максимум газу, що виділяється зі стінок при здійсненні прогрівання настає раніше, ніж через 24 години, ймовірно десь через 15-20 годин. Оскільки намітився спад кількості відкачуваного з камери газу, наступні вимірювання проводилися з меншим інтервалом часу між ними. На графіку видно продовження різкого зменшення кількості викачуваного газу з камери ($P_{g1}=5.85$ Па та $P_{g3}=3.6$ Па), що відбулося протягом 3-х годин. Останнє значення P_{g3} навіть менше, ніж у випадку фонового газовиділення ще не прогрітої камери (див рис. 3.11 стовпець 1). Цей факт свідчить про те, що прогрівання камери призводить до покращення вакууму у ній. На підставі отриманих результатів було запропоновано проводити безперервний прогрів стінки камери стеларатора Ураган-2М тривалістю 30-40 годин.

На другому етапі експериментів з чищення камери було вирішено поєднати прогрів стінки з впливом безперервного УКХ розряду на частоті 130 МГц.

За результатами проведених досліджень, було запропоновано збільшити швидкість відкачування на установці Ураган-2М. Цю пропозицію було вирішено реалізувати за допомогою додаткової кріогенної пастки на другому турбомолекулярному насосі системи, що відкачує. В результаті, на установці Ураган-2М була розроблена і встановлена додаткова кріогенна пастка на вхідний патрубок другого турбомолекулярного насоса.

Також було проведене порівняння режимів очищення різними розрядами. На рисунку 3.13 наведено порівняння результатів вимірювання P_g при прогріванні камери без очищення (1) і під час ВЧ-очищення одночасно працюючими УКХ та НВЧ-генераторами. На рисунку видно різке збільшення значень P_g при включенні ВЧ очищення. Причому, при проведенні цих вимірювань відкачка камери здійснювалася за допомогою більш продуктивної модифікованої відкачувальної системи. Вона складається з двох кріогенних пасток. І навіть в цьому випадку, значення P_{g2} (24 Па) у поєднанні ВЧ очищення з прогріванням більш ніж на порядок вище, ніж в режимі тільки прогрівання ($P_{g1}=1.73$ Па) [135].

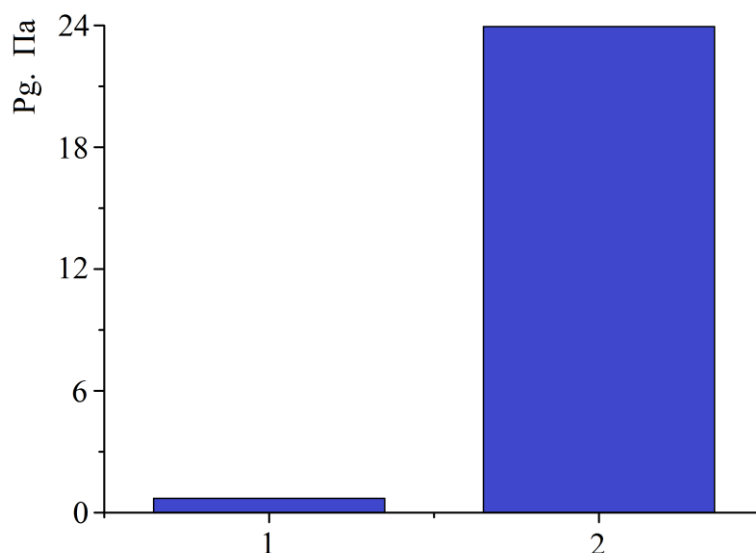


Рис. 3.13 Порівняння режиму прогрівання (1) з одночасним ВЧ очищенням в режимі безперервного УКХ розряду (2) [133].

3.5. УКВ очищення в атмосфері гелію.

При проведенні очищення в атмосфері гелію (He) в стелараторі Ураган-2М її ефективність визначалася тим самим способом, як було описано вище при використанні криогенної пастки. Очищення проводилося при одночасній роботі генераторів Каскад-1, Каскад-2 спільно з генератором УКХ, що працює в безперервному режимі, в атмосфері гелію. За 10 днів очищення величина P_g зменшилась в 2,5 рази (з 2,66 до 1,06 Па) (рис.3.10 ліворуч).

На правій частині рис. 3.14 видно, що ефективність очищення в гелії, при комбінації УКХ+ВЧ розряді (колонка 1) в 2-2,5 рази вище, ніж у випадку використання тільки імпульсного ВЧ розряду (колонка 2). Вимірювання проведені вже на завершальній стадії очищення.

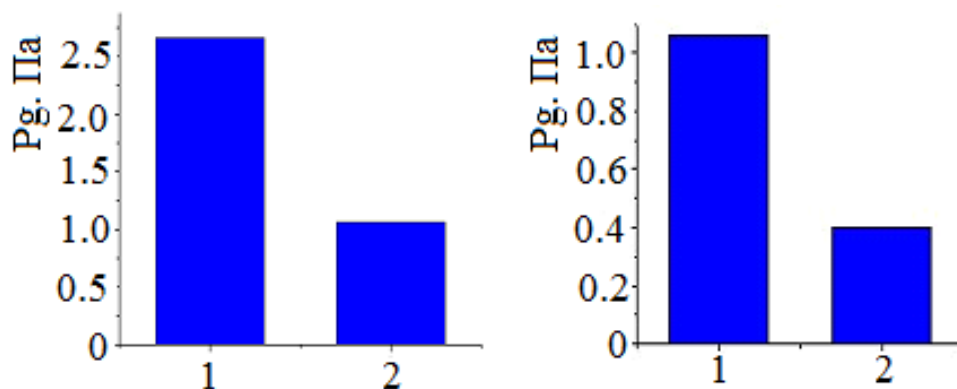


Рис. 3.14 Ліворуч—зміна тиску P_g за 10 днів очищення: 1—після першого дня очищення, 2—після десятого. Праворуч —порівняння P_g при різних поєднаннях розрядів : 1—одночасний УКХ та ІЦР розряди, 2—тільки ІЦР розряд [133].

Ці дані узгоджуються з інформацією про більш високе завантаження антени Каскада-1 при спільній роботі з УКВ генератором, які були отримані при вивченні залежності завантаження контуру рамкової антени від магнітного поля в режимі очищення вакуумної камери стеларатора Ураган-2М і були наведені вище (див. розділ 2).

При проведенні даного експерименту з очищення вакуумної камери стеларатора Ураган-2М здійснювався контроль складу газу в камері. Щодня вимірювалися парціальні тиски газів на наступний день після проведення одноденного режиму очищення. На рисунку 3.15 наведено парціальні тиски газів в камері установки після 10 днів проведення очищення в порівнянні зі станом камери перед початком очищення.

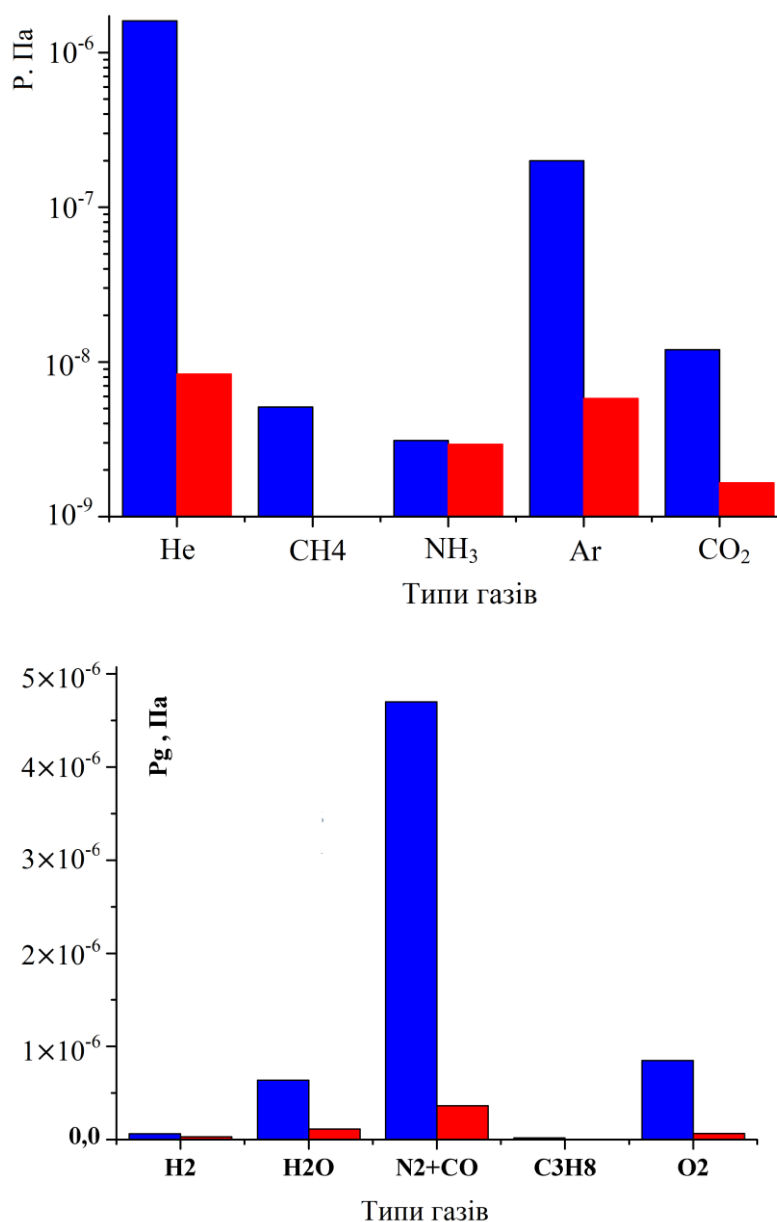


Рис. 3.15 Дані ВПТО отримані в результаті ВЧ очищення за 10 днів (стовпчик ліворуч (синій)-до початку очищення, праворуч (червоний)-після 10 днів) [133].

За даними ВПТО (рис. 3.15) за 10 днів очищення знизилися парціальні тиски таких газів: пари води-в 4 рази, двоокису вуглецю- CO_2 -в 1,6 рази, водню- H_2 в 2,5 рази, метану- CH_4 -з $6 \cdot 10^{-9}$ -практично до 0. Кисню- O_2 -в 1,1 рази, рівень тиску пропану- C_3H_8 - впав до 0. [133].

3.6. УКХ очищення без магнітного поля в атмосфері суміші водню і азоту

Були проведені експерименти на Урагані-2М з дослідження ВЧ 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.

Ефект очищення стінок досягається завдяки взаємодії атомного водню, що утворюється при розряді, з накопиченими на поверхні стінок вакуумної камери домішками. УКХ очищення проводили за допомогою безперервного розряду на частоті 130 МГц. Потужність ВЧ джерела була близько 3 кВт.

В якості робочих газів використовувались водневі, азотні та воднево-азотні суміші. Вимірювали спектр оптичної емісії для кожного плазмового розряду. Густина плазми та температура електронів у горизонтальній площині вимірювались ленгмюровським зондом у перерізу антени. Температура електронів, яка оцінювалася за допомогою оптичних вимірювань по лініях серії Фулхера, становить приблизно $2 \div 3$ еВ, що відповідає результатам зондових вимірювань.

Антену УКХ джерела вироблена з труби з неіржавіючої сталі 1 см в діаметрі і має квадратну форму з довжиною сторони 10 см. Потенціал зміщення зонда Ленгмюра змінювався в межах -150 до +100 В для отримання вольтамперної характеристики. При цьому для кожного вимірювання виділялося 2-3 розряда з фіксованим потенціалом зонда.

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

$$I(V) \approx I_s \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{V-V_f}{T_e}\right) \right], \text{ де } V\text{-напруга зміщення зонда.}$$

Струм іонного насичення можна записати як $I_s \approx 0.5S_{pr} \cdot en_e \sqrt{2T_e/m_i}$, 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.

Можна оцінити густину плазми за допомогою заміщення різних іонних мас у 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^+).

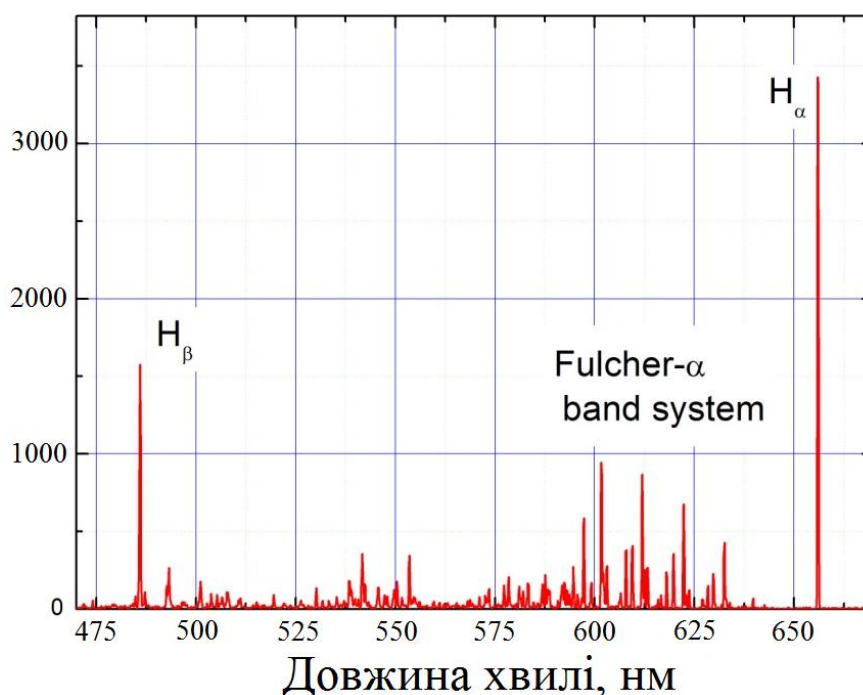


Рис. 3.16 Спектр емісії плазмового розряду у водні [136].

На рис 3.16 і 3.17 приведені спектри розрядів у водні і в 50% суміші водню і азоту відповідно.

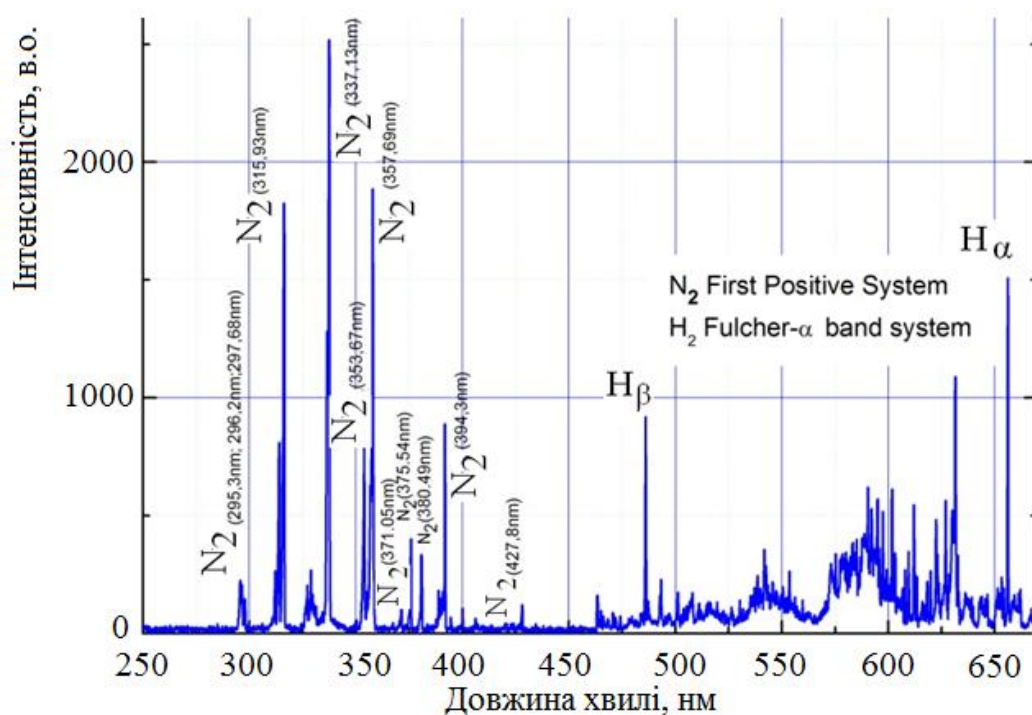


Рис. 3.17 Спектр плазмового розряду сумішей N_2 та H_2 із об'ємним співвідношенням газів 50%/50% [136]

Був визначений оптимальний для ВЧ очищення стінок робочий газ - вміст воднево-азотної суміші зі співвідношенням об'єму 50/50%, це забезпечує такі параметри плазми: температура електронів 2...4 еВ и плазмова густина $\sim 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Результати вимірювань наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахункові параметри плазми при різних сумішах газів

параметри	суміш газів		
	2	$H_2(50\%)$ + $N_2(50\%)$	$H_2(<10\%)$ + $N_2(\sim 90\%)$
Відстань зонда від стінки камери, мм	87.5	87.5	87.5
$V_{\text{п}}, \text{V}$	50	37	64.5
T_e, eV	2.7	4.1	1.8

n_e (см ⁻³) для H ₂ ⁺ , $m_i=2$ а.м.у. =	$5.1 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^9$	$8.6 \cdot 10^8$
n_e (см ⁻³) для N ⁺ якщо $m_i=14$ а.м.у. $n_e=$	---	$4.8 \cdot 10^9$	$2.3 \cdot 10^9$
n_e (см ⁻³) для N ₂ ⁺ якщо $m_i=28$ а.м.у.	---	$6.8 \cdot 10^9$	$3.2 \cdot 10^9$

Такі параметри були найбільш відповідні для обраного сценарію очищення стінок вакуумної камери. Для оцінки динаміки очищення був обраний описаний вище спосіб із застосуванням криогенної вакуумної пастки. Для калібрування вимірювань були проведені вимірювання фонового газовиділення при вже напущеному робочому газі.

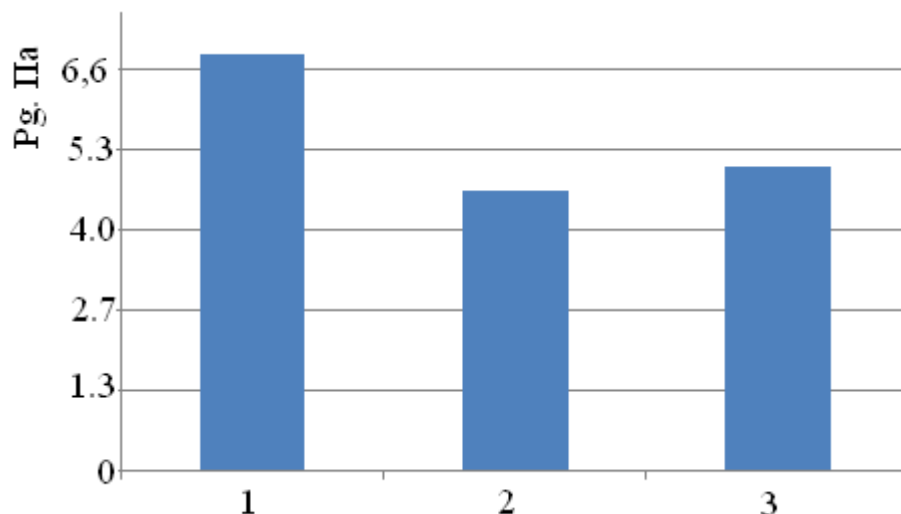


Рис. 3.18 Тиск в об'ємі пастки після 5-хвилинної експозиції. Стовпець 1 для газової суміші становить 50% водню+50% азоту, P у камері=4 Па. Стовпець 2-рівень фону під час відкачки азоту, P у камері=3.3 Па. Стовпець 3-рівень фону під час відкачки водню, P у камері=4 Па [136]

З рисунка 3.18 видно, що при заповненні камери сумішшю газів, рівень фонового газовиділення трохи вище (приблизно в 1,5 рази), ніж при заповненні камери одним якимось газом.

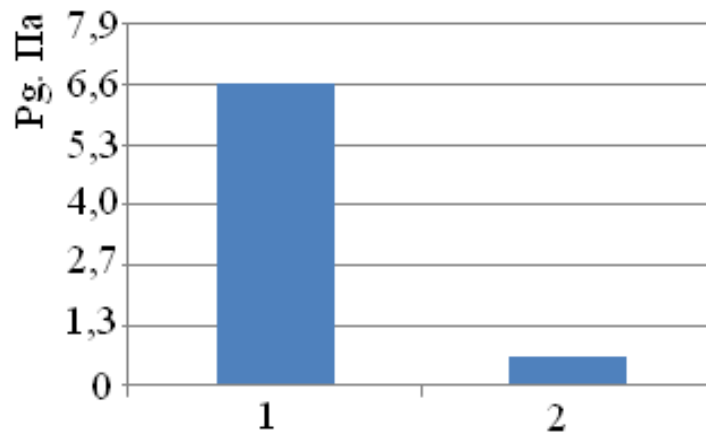


Рис. 3.19 Вимірювання P_g протягом УКХ очищення. 1-на початку кампанії, 2-після 45 годин очищення [136]

На рис. 3.19 представлено діаграму порівняння значень P_g протягом УКХ очищення. Стовпець 1 відповідає очищенню стінок на початку експериментальної кампанії, а стовпець 2-після 45 годин очищення стінок. Видно, що після 45 годин очищення кількість десорбованих домішок, відкачаних з вакуумної камери зменшено практично в 10 разів.

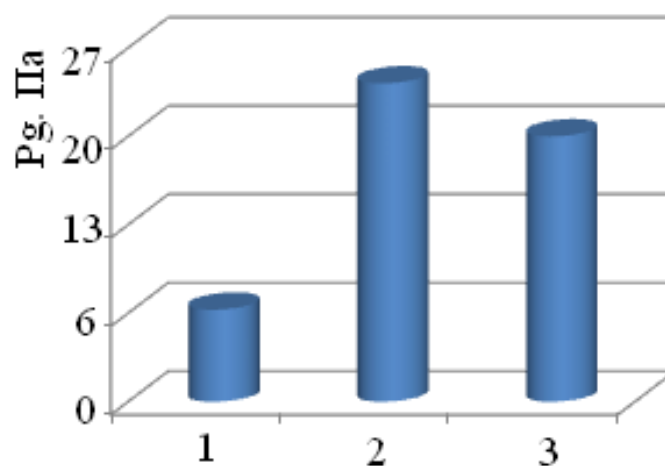


Рис. 3.20 Порівняння значень P_g для очищення стінок у чистому водні та у 50% суміші водню та азоту. Витримка часу склала 5 хвилин. Стовпець 1-

очищення у водні, стовпці 2 і 3-у разі газових сумішей: 2-50/50%, 3-10/90% (H_2/N_2) [136]

На рис. 3.20 видно, що очищення в атмосфері чистого водню практично забезпечує в 4 рази менш інтенсивне виробництво летючих речовини, ніж у суміші водню і азоту.

В результаті проведеної кампанії з відпрацювання режимів очищення УКХ розрядом без магнітного поля залишковий тиск у вакуумній камері досяг мінімального значення 8.2 Па (відкачка проводилася тільки одним форвакуумним насосом) за 25 годин описаного режиму очищення стінок вакуумної камери. І ця величина не змінювалася до кінця кампанії. Це свідчить про те, що такий режим очищення цілком придатний для застосування в термоядерних установках [136].

Висновки по розділу 3

1. Проведено експериментальне дослідження методу ВЧ очищення безперервним УКХ полем з частотою (130 МГц), що є вище за частоту ІЦР. Було експериментально підтверджено ефективність данного методу очищення. Даний метод актуально застосовувати в установках із надпровідними котушками магнітного поля. За результатами очищення також було висунуто припущення про сильне забруднення стінок вакуумної камери стеларатора.
2. Розроблений метод контролю ефективності очищення вакуумної камери. Він використовувався в експериментах для контролю процесу очищення вакуумної камери стеларатора Ураган-2М. Метод дозволяє отримувати інформацію про кількість конденсованого газу на вакуумній пастці, яка пропорційна кількості відкачуваного газу з вакуумної камери в процесі здійснення її ВЧ очищення. За результатами проведених вимірювань, було показано ефективність очищення УКХ розрядом, а також при поєднанні

УКХ розряду та імпульсних розрядів джерел Каскад. Виявлено, що можна скоротити час нагрівання стінки вакуумної камери. Також було запропоновано підвищити швидкість відкачування вакуумної системи установки шляхом встановлення кріогенних вловлювачів вхідних патрубків усіх турбомолекулярних насосів.

3. Експериментально показано, що проведення ВЧ очищення на стелараторі Ураган-2М одночасно з прогріванням стінки камери протягом двох - трьох діб сприяє інтенсифікації процесу очищення. Об'єднання безперервного УКХ розряду з потужними ВЧ імпульсами джерел Каскад збільшує кількість викачуваного газу з камери. тобто підвищує ефективність процесу очищення.

4. Використання ВЧ поля, створюваного джерелом Каскад-0, навантаженим на малу рамочну антену, дозволило сформувати попередньо іонізовану плазму. Створення цієї плазми дозволило розвивати подальший розряд за більш короткий проміжок часу. Причому, стабільність часу пробоя різко зросла, що дозволило виконати широтно-імпульсні вимірювання параметрів плазми. На параметри основного розряду передіонізаційна плазма практично не впливає.

5. Розроблено джерело безперервного електромагнітного поля УКХ діапазону. Його призначення-створення плазми низької густини для проведення і відпрацювання режимів очищення вакуумної камери. Це однотактний автогенератор з резонансною системою у вигляді короткозамкнутого відрізка повітряної коаксіальної лінії.

Результати досліджень даного розділу наведено у публікаціях здобувача [127], [128], [129], [132], [133], [134], [135], [136].

РОЗДІЛ 4

УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ ЕЛЕКТРОНІВ-УТІКАЧІВ У СТЕЛАРАТОРАХ УРАГАН

4.1 Теоретичне дослідження способу впливу електростатичного поля на потік електронів-утікачів в стелараторах

У сильному електричному полі частинка, що має достатню швидкість на довжині свого вільного пробігу, здатна накопичувати енергію, не зважаючи на втрати при зіткненнях з іншими частинками. Цей ефект було вперше розглянуто Вільсоном при дослідженні руху бета-частинок в атмосфері [137]. Еддінгтон назвав такі електрони, що постійно набирають енергію, електронами, що втікають [138]. Фізика таких електронів отримала свій істотний розвиток стосовно повністю іонізованої плазми [139-144]. Одним з перших авторів, які подали аналітичний опис механізму виникнення електронів, що втікають в своїх роботах, був Драйсер (Dreiser) [140]. Максимальна енергія, яку може придбати частинка, що прискорюється, багато в чому визначається часом її утримання, тобто знаходженням у полі, що прискорює. У разі, коли частинка набуває енергію вище критичної, вона виходить з об'єму утримання. Після цього частинка зіштовхується зі стінками вакуумної камери і різними металевими елементами обладнання, розміщеного всередині вакуумної камери. Внаслідок чого утворюється жорстке рентгенівське випромінювання. Використовуючи це явище можна виявляти потік електронів-утікачів (ЕУ). Електрони, що втікають, суттєво впливають на діагностику і енергетичний баланс домішок в плазмі стелараторів [143,144].

Передбачається, що в сучасних установках ЕУ з'являються, коли відношення тороїдального електричного поля до Дрейсеровського (Dreiser field) більше, ніж 0,01–0,02. Ці ЕУ є основними, що здатні привести до

утворення лавинного процесу [142]. Оскільки при цьому частота зіткнень між електронами зменшується, так як їх швидкість збільшується, саме ці явища зумовлюють генерацію ЕУ [145].

Отже, запобігання генерації або пригнічення пучків електронів-утікачів, після їх виникнення мають важливе значення для ІТЕР. Це необхідно для забезпечення безпечної та надійної роботи плазмової установки і запобігає тривалим періодам простою для ремонту.

Якісний розгляд. Вихрове електричне поле E , що виникає в торсатроні при збільшенні струму в гвинтових обмотках, призводить до виникнення кінцевої напруги на обході тора $U_B = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ (тут $d\mathbf{l}$ -елемент довжини магнітної осі установки). У такому полі, при тиску нейтрального газу нижче деякої критичної величини, електрична сила, що діє на електрони, може перевершити силу тертя, що виникає внаслідок зіткнень електронів з молекулами нейтрального газу, і електрони переходять в режим безперервного прискорення. На початковому етапі прискорення, коли енергія електрона вище порога іонізації молекул нейтрального газу, але не дуже велика (нижче величини, що дорівнює одній тисячі порогів іонізації) електрони іонізують нейтральний газ. Електрони, що знову виникли, залучаються до процесу безперервного прискорення та іонізації, стимулюючи лавину іонізації. Розглянемо баланс електронів на початковому етапі прискорення.

$$\frac{dN_{beg}}{dt} = \nu_i N_{beg} - N_{beg} / \tau_{ac} . \quad (4.1)$$

Тут N_{beg} - кількість електронів цієї групи, $\nu_i = n_m \langle \sigma_i V_e \rangle$ - швидкість іонізації (n_m - густина нейтрального газу, σ_i - переріз іонізації і величина $\sigma_i V_e$ усереднена по ансамблю електронів), τ_{ac} - час прискорення, тобто час, за який електрони залишають цю групу через занадто високе значення кінетичної енергії. Рішення рівняння (4.1) має вигляд $N_{beg} = N_0 \exp(\gamma t)$, де $\gamma = \nu_i - 1/\tau_{ac}$. Якщо

γ позитивна (густина нейтрального газу досить велика), то має місце лавина іонізації. В протилежному випадку лавина не розвивається.

Впливати на розвиток лавини можна шляхом введення потенціального електростатичного бар'єру на шляху електрона. Рівняння руху електрона у вихровому електричному і електростатичному полях має вигляд:

$$m_e \frac{dv_{e\parallel}}{dt} = eE_{\parallel} - e \frac{\partial \varphi_e}{\partial l} . \quad (4.2)$$

Тут m_e маса і $v_{e\parallel}$ поздовжня компонента швидкості електрона, e -заряд електрона (негативний), $E_{\parallel} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} / B$ -поздовжня компонента вихрового електричного поля φ_e - електростатичний потенціал. Ми нехтуємо часовою залежністю $E_{\parallel}$, оскільки час оберту електрона навколо установки значно менше часу наростання магнітного поля.

Ми множимо обидві частини рівняння (4.2) на $v_{e\parallel}$ і, використовуючи

формули $v_{e\parallel} = \frac{dl}{dt}$, $v_{e\parallel} E_{\parallel} = \frac{d}{dt} \int E_{\parallel} dl$, отримуємо інтеграл рівняння

$$\varepsilon = K + P = const , \quad (4.3)$$

який описує еволюцію поздовжньої енергії частинки $K = \frac{m_e v_{e\parallel}^2}{2}$ (тут $K = \frac{m_e v_{e\parallel}^2}{2}$ - кінетична поздовжня енергія електрона, $P = e(\varphi^* + \varphi_e)$ -ефективна потенціальна енергія, $\varphi^* = -\int E_{\parallel} dl$).

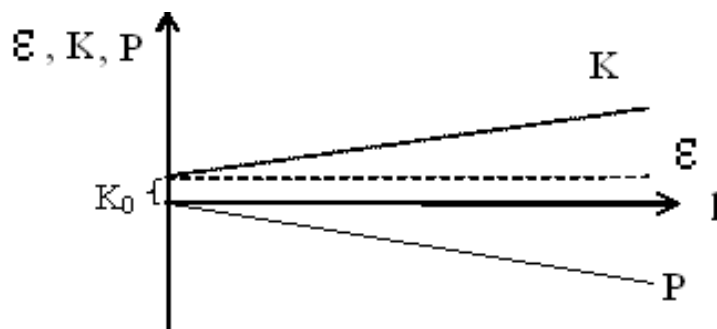


Рис. 4.1 Залежність потенційної P і кінетичної K енергій і енергетичного інваріанта ε від поздовжньої координати l для випадку, коли електростатичне поле відсутнє [146]

Відзначимо, що якщо електростатичний потенціал періодичний по обходу тора, то квазіпотенціал φ^* на обході тора отримує приріст, що дорівнює напрузі на обході $\varphi^*(l+2\pi R) - \varphi^*(l) = U_B$.

Рух електрона в разі нульового електростатичного поля ілюструє рис. 4.1.

Оскільки потенціальна енергія електрона зменшується в позитивному напрямку вісі l , електрон рухається в цьому напрямку, постійно збільшуючи свою кінетичну енергію. Випадок накладення електростатичного поля позитивного заряду представлений на рис. 4.2.

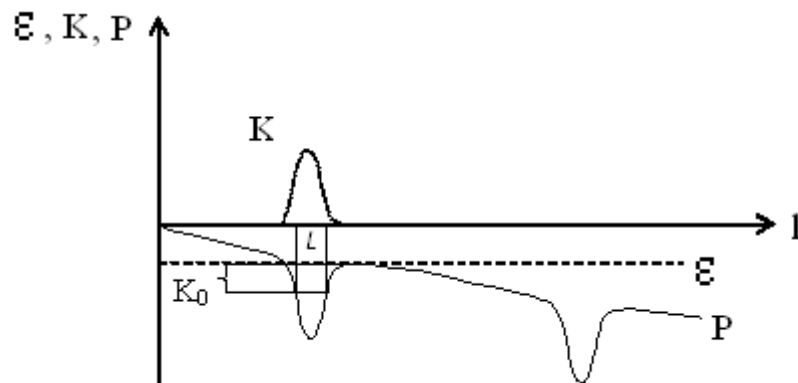


Рис. 4.2 Залежність потенційної P і кінетичної K енергій і енергетичного інваріанта ε від поздовжньої координати l для випадку, коли накладено електростатичне поле позитивного заряду [146]

Коли електростатичний потенціал досить великий, просторова залежність ефективної потенціальної енергії стає немонотонною. Вона має мінімум поблизу максимуму електростатичного потенціалу і потенціальну яму в його околиці та максимум праворуч від неї. Якщо електрон народився всередині такої потенціальної ями і його ефективна потенціальна енергія

менше, ніж $P_{\max} - K_0$, ($P_{\max}$ -максимальне значення ефективної потенціальної енергії, K_0 -початкова кінетична енергія електрона), то він не може вилетіти з ями, відбиваючись від точок, де $K=0$. Він не отримує енергію від вихорового електричного поля і не бере участі в процесі лавиноутворення. Електрони, що народилися поза межами потенціальної ями, безперервно прискорюються. Тільки вони поповнюють популяцію прискорених електронів. З цієї причини величина швидкості приросту електронів у формулі (4.1) повинна бути скоригована $\nu_i N_{beg} \rightarrow \tilde{\nu} N_{beg}$. Тут $\tilde{\nu} = C \nu_i$, $C = \frac{2\pi R - L}{2\pi R}$, де L -ширина потенціальної ями. Оскільки яма вузька, ефект від корекції невеликий.

В разі накладання поля негативного заряду, який показаний на рис. 4.3, утворюється велика потенціальна яма поза областю накладання електростатичного потенціалу.

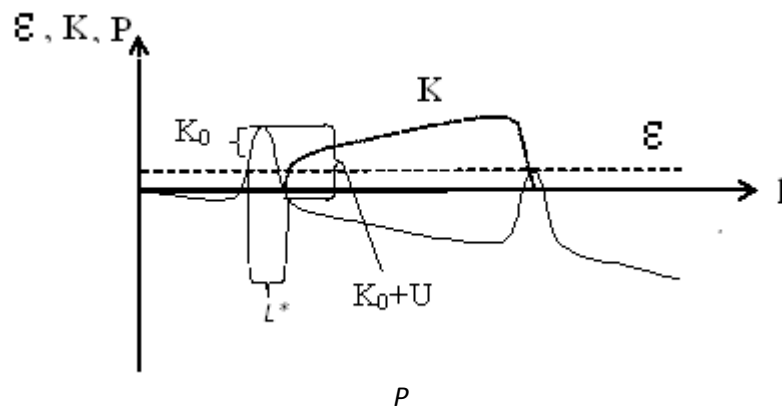


Рис. 4.3 Залежність потенціальної P і кінетичної K енергій і енергетичного інваріанта ϵ від поздовжньої координати l для випадку, коли накладено електростатичне поле негативного заряду [146]

Ефективна потенційна енергія має вузький пік в області накладання потенціалу. Пролітають тільки ті електрони, в місці народження яких ефективна потенційна енергія більше величини $P_{\max} - K_0$, якщо електрон народився зліва від максимуму, і $P_{\max} - K_0 - eU$, якщо справа. Ширина зони народження пролітаючих електронів L^* тим менше, чим вище величина

електростатичного потенціалу. Значення коефіцієнта зміни швидкості іонізації дорівнює $C = \frac{L^*}{2\pi R}$ [146].

4.2 Експериментальні дослідження впливу постійного потенціалу на потоки ЕУ в стелароторі Ураган-3М

Що стосується торсатрона "Ураган-3М", то висновок про присутність у його камері потоку ЕУ було зроблено на підставі результатів вимірювань, які вказали на наявність високоенергетичних частинок в об'ємі утримання плазми. Причиною формування потоку таких електронів є виникнення напруги на обході тора за рахунок імпульсної форми магнітного поля, що утримує плазму. Слід зазначити, що експерименти з використанням електростатичного потенціалу на межі з плазмою проводилися і раніше на деяких термоядерних установках, проте завданням цих досліджень було стимулювання переходу на краще утримання плазми [147].

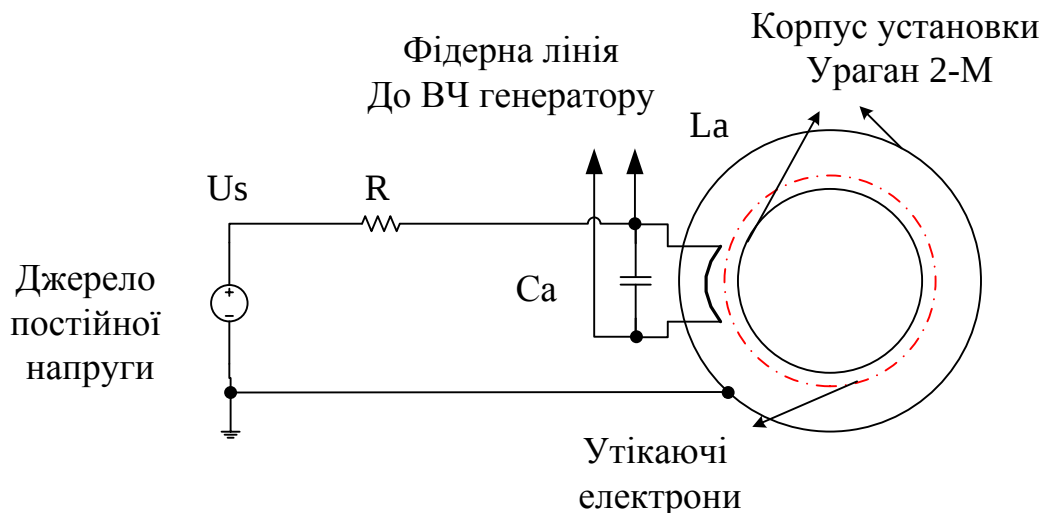


Рис. 4.4 Схематичне зображення експерименту з пригнічення ЕУ постійним потенціалом [148]

Експерименти проводилися на установці Ураган-3М, основні параметри можна знайти в роботі [2]. Створення і нагрівання плазми здійснюється ВЧ методом на частотах поблизу іонного циклотронного резонансу ($\omega = 0,8\omega_{ci}$).

Всередині вакуумної камери торсатрону Ураган-2М встановлені антени, призначені для введення ВЧ енергії від генераторів в об'єм камери для створення і нагрівання плазми. Для перевірки можливості пригнічення потоку ЕУ постійним потенціалом одна з цих антен використовувалася в якості керуючого електрода для електронів, що тікають, як аналог керуючої сітки в вакуумному триоді. Це антена L_a (див. рис.4.4.) рамкового типу, її виводи не з'єднані з корпусом вакуумної камери установки, тому її можна використовувати в якості потенціального електрода. До антени підводилася постійна напруга U_s . При цьому, паралельно антені були приєднані фідерна лінія, що передає ВЧ енергію від генератора, і конденсатор C_a (C_a і L_a є елементами антенного ВЧ контуру). Для захисту джерела постійної напруги (ДПН) від можливого впливу плазми на антену і через неї на ДПН підключений обмежуючий резистор R . Величина резистора склала 100кОм. При проведенні експерименту величина напруги U_s змінювалася як за амплітудою (від 0 до 100 В), так і за знаком (-або+).

Живлення обмоток утримуючого магнітного поля здійснювалося в імпульсному режимі. Величина магнітного поля становила $B_0=7\text{кЕ}$. Тривалість імпульсу поля, що подавався, була близько 5 секунд. Причому, тривалість фронту і спаду імпульсу становила по 1 с. Тиск робочого газу-водню, при цьому становив $212\cdot 10^{-6}$ Па. Для діагностики наявності електронів, що втікають контролювався рівень рентгенівського і електронно-циклотронного випромінювання.

При подачі на антену-електрод негативної напруги встановлювалося три значення напруги: $U_s = -100\text{ В}, -50\text{ В}$ і -10 В . При подачі позитивної напруги величини U_s склали: $+20\text{ В}, +50\text{ В}$ і $+100\text{ В}$.

Поведінка потоку ЕУ, що діагностується по синхротронному випромінюванню (на частоті 60 GHz), струму частинок (що вимірюється за допомогою пояса Роговського) і жорсткому рентгенівському випромінюванню, при подачі потенціалу U_s поблизу крайньої замкнутої поверхні в торсатроні Ураган-3М показано на рис. 4.5. На ньому добре

видно, що при подаванні на антену-електрод негативної напруги $U_s = -100$ В, контрольовані випромінювання не виявлені ні на фронті, ні на спаді імпульсу магнітного поля.

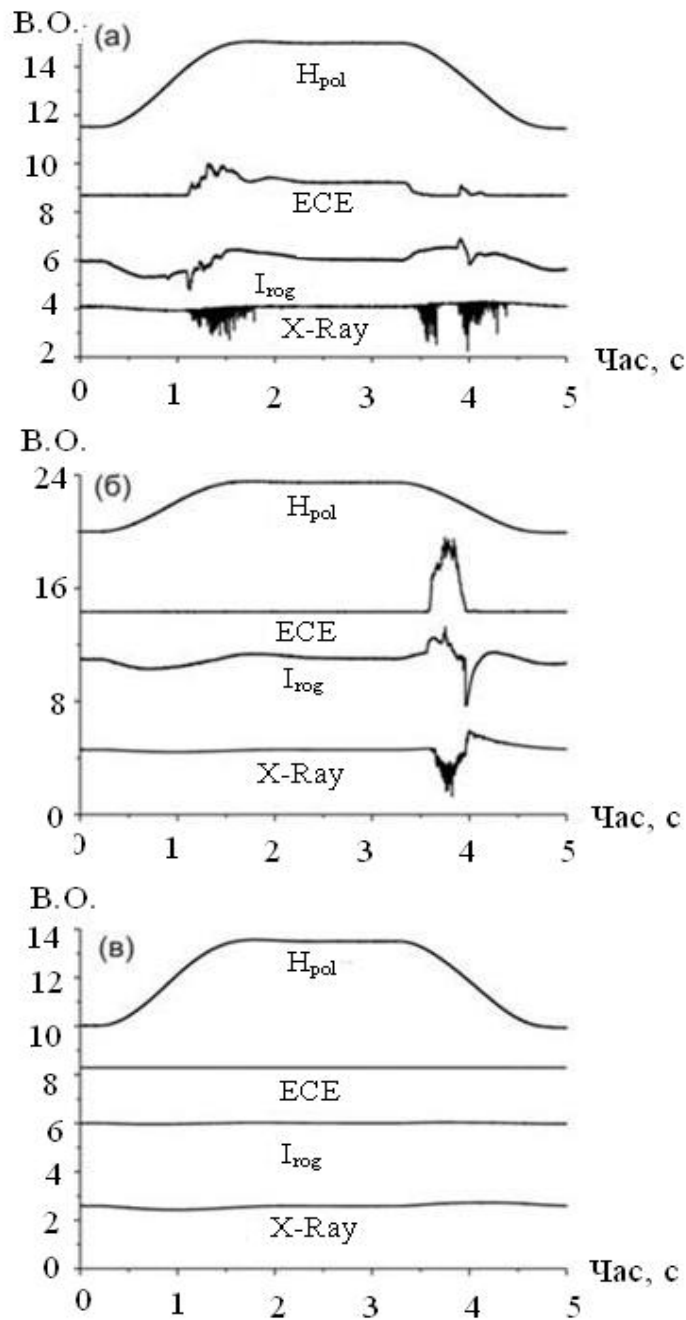


Рис. 4.5 Осцилограми полоїдального магнітного поля, сигналу на частоті 60 ГГц, струмового сигналу з поясу Роговського і інтенсивності жорсткого рентгенівського випромінювання при подачі на антену-електрод потенціалів +100 В (а), +20 В (б), -100 В (в)

Це пояснюється впливом постійного електричного поля в місці розташування електрода на електрони, що пролітають. Вони утримуються цим полем, заважаючи електронам відхилятися на стінку установки.

При $U_s \leq -10\text{В}$ фіксувалося рентгенівське випромінювання. При подаванні ж на антену позитивної напруги було зафіксовано як рентгенівське так і електронно-циклотронне випромінювання. Причому, при величині $U_s = +100\text{ В}$, випромінювання фіксувалися як на фронті, так і на спаді. А при $U_s = +20\text{В}$ - тільки на спаді [146, 148].

4.3 Експериментальні дослідження впливу постійного потенціалу на потоки ЕУ в стелараторі Ураган - 2М

У середині камери U-2М розташовані антени, до яких підводиться ВЧ потужність від відповідних генераторів для створення і нагрівання плазми. У наших експериментах також одна з цих антен використовувалася в якості керуючого електрода для пригнічення електронів, що втікають. Це теж антена рамкового типу, виходи якої не з'єднані з корпусом вакуумної камери. Схема підключення напруги що пригнічує U_s до антени-електроду була аналогічною, як і при проведенні подібного експерименту на установці Ураган-3М. Тобто, до антени був підключений ВЧ фідер через пристрій узгодження, конденсатор C_a був включений паралельно антені L_a . Резистор R номіналом 100 кОм також був приєднаний між антеною та джерелом постійної напруги. В ході даного експерименту на антену подавалася постійна напруга U_s , яка змінювалася в діапазоні від 0 В до 100 В , до того ж полярність його змінювалася. Величина магнітного поля при цьому становила $H_0 = 0,4\text{ Тл}$. Тиск робочого газу дорівнював $468 \cdot 10^{-6}\text{ Па}$.

На рис. 4.6. зображена залежність жорсткого рентгенівського випромінювання від величини переважної напруги що пригнічує U_s . Візуально помітно, що графік цієї залежності практично симетричний відносно точки $U_s = 0\text{ В}$. При відсутності замикаючого потенціалу (або його

зміні в межах від -10 В до $+10$ В) фіксувався високий рівень рентгенівського випромінювання. Значне зниження рівня рентгенівського випромінювання починається при $U_s = 20$ В різної полярності. При величині U_s близько 50 В і вище, рентгенівське випромінювання і струм в котушці Роговського не фіксувалися зовсім [149,150].

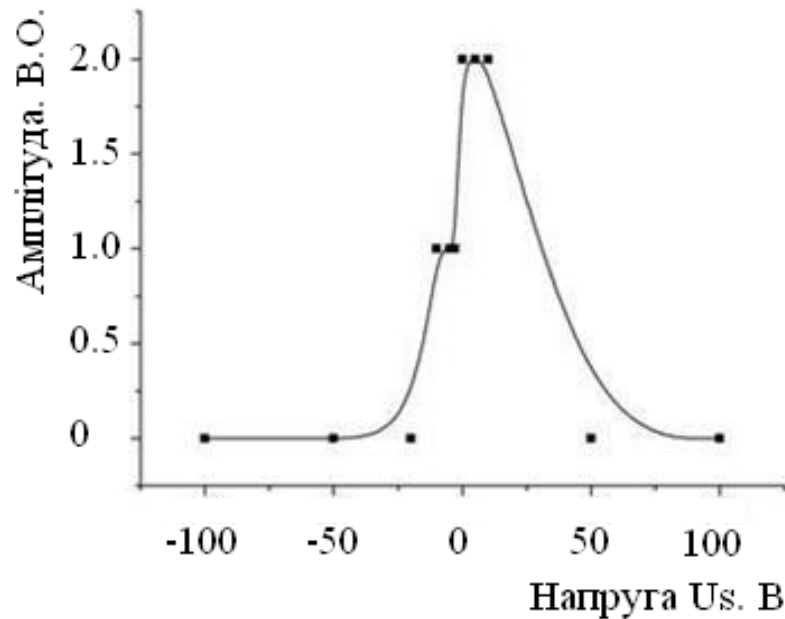


Рис. 4.6 Залежність рівня жорсткого рентгенівського випромінювання (hardX-ray) від величини її напруги що пригнічує U_s , прикладеного до антени-електроду

У попередніх експериментах розглядалася принципова можливість пригнічення потоку електронів, що втікають, за допомогою подачі на антену ВЧ генератора, що знаходиться всередині камери стеларатора, керуючого потенціалу. Однак, антена, на яку подавався керуючий потенціал, була пасивною. Тобто, ВЧ потужність в неї не вводилася, а плазма створювалася іншою антеною, що живиться від другого ВЧ генератора. Зазвичай при проведенні наукових досліджень на стелараторах Ураган використовуються дві антени, які живляться від двох ВЧ генераторів Каскад [103]. За

допомогою однієї з них створюється плазма в робочій камері стеларатора, а за допомогою ВЧ потужності, що вводиться в другу антену, здійснюється нагрівання плазмового шнура. Виникло питання про вивчення можливості використання однієї з працюючих ВЧ антен в якості електрода для пригнічення ЕУ. Для експериментальної перевірки цього питання була обрана рамкова антена, за допомогою якої створювався початковий пробій робочого газу.

Проведення експерименту. У стелараторі Ураган-2М проводилися експерименти з ВЧ нагрівання плазми за допомогою іонно-циклотронного резонансу в атмосфері водню. Плазма створювалася ВЧ генератором Каскад-1, що працює на частоті 5,6 МГц, нагрівання плазми здійснювалося другим генератором Каскад-2 на частоті 5,2 МГц. Схема ВЧ нагрівання така: ВЧ енергія від генератора через лінію передачі надходить в антенний пристрій через пристрій узгодження, який складається з індуктивності L_m і ємності C_m . (Рис. 4.7). У початкових експериментах тиск водню в камері становив $6 \div 2,33 \cdot 10^{-3}$ Па, а величина магнітного поля при цьому дорівнювала 0,36 Тл. Величина ВЧ потужності, що вводилася в антену коленвального типу, від генератора Каскад становила близько 80 кВт, а ВЧ потужність, що вводиться в антену рамкового типу від генератора Каскад-2-близько 100 кВт. Для вивчення впливу пригнічення потоку електронів, що втікають, на параметри пробою робочого газу в стелараторі Ураган-2М на працюючу антену, за допомогою якої здійснювався ВЧ пробій, подавалася також і керуюча напруга для пригнічення ЕУ- U_s (рис. 4.7). Причому, в одному випадку, ця напруга була незмінною (постійною) протягом всього імпульсу магнітного поля (контролювався струм в обмотках установки). А в іншому варіанті, подавався імпульс негативної напруги пригнічення. Тривалість цього імпульсу пригнічення змінювалася в межах від 10 мс до 1 с. Також змінювався і момент його подачі по відношенню до імпульсу магнітного поля-від початку збільшення струму в котушках установки до початку плоскої ділянки (стола) цього струму.

Щоб захистити джерело напруги, що управляє, від впливу ВЧ напруги, що подається на антену від генератора, безпосередньо до антенних виходів був приєднаний Г-подібний фільтр низьких частот. Фільтр утворений індуктивністю L_f і ємністю C_f (Рис. 4.7).

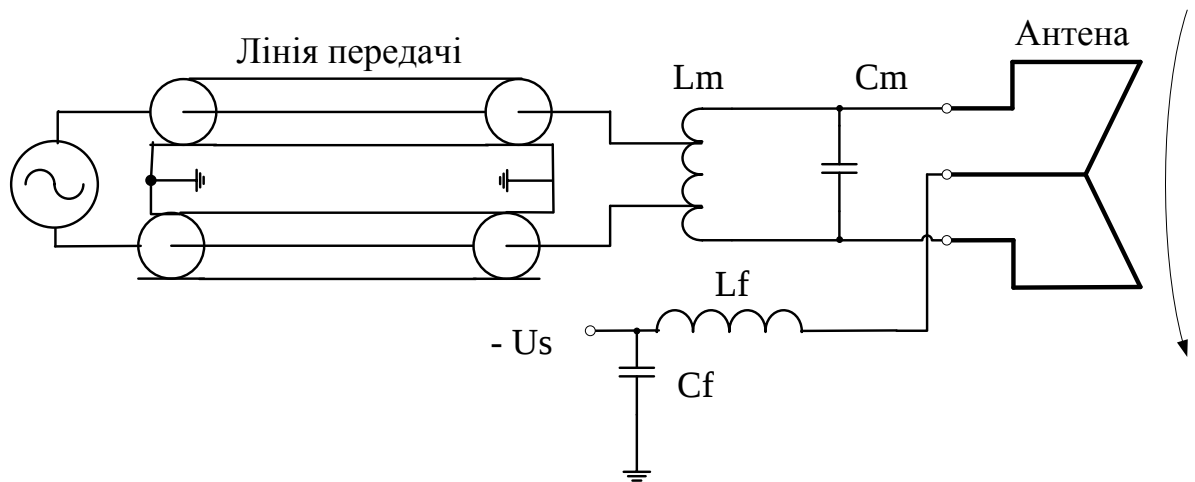


Рис. 4.7 Принципова схема подачі керуючого сигналу для пригнічення потоку ЕУ на працюючу антену [151]

Його смуга пропускання розраховувалася за формулою $P_{ff} = 1/(2\sqrt{LC})$ і, з міркувань безпеки повинна була становити менш ніж 100 кГц. Така низька частота фільтра була обрана, щоб виключити вплив, в тому числі, і різницевих частот ВЧ генераторів, в режимах, коли вони працюють на близьких частотах генерації. При використанні конкретних встановлених елементів ($C_f = 10000$ пФ, $L_f = 6$ мГн), смуга пропускання фільтра склала 20,5 кГц, що виключає можливість впливу на джерело переважної напруги практично всіх комбінаційних частот, що виникають в камері установки при створенні плазми.

На першому етапі проводилося дослідження можливості пригнічення потоків прискорених частинок, що мимовільно формуються в стелараторах шляхом надання імпульсної напруги що пригнічує U_s на антену-електрод, за допомогою якої здійснювався пробій робочого газу. Подавалися імпульси негативної полярності тривалістю 500 мс і амплітудою від 25 В до 50 В. Наявність ЕУ фіксувалася вимірюванням рентгенівського випромінювання.

Було виявлено, що при подачі негативного імпульсу постійної напруги амплітудою -25 В, пригнічення потоку ЕУ не відбувалося. У той час як, при амплітуді імпульсу -50 В, було досягнуто впевнене пригнічення потоку ЕУ при однаковій тривалості імпульсів напруги пригнічення U_s і інших параметрів експерименту.

Наступним кроком була спроба встановити необхідний момент часу подачі імпульсу напруги що пригнічує U_s по відношенню до імпульсу струму в магнітних котушках установки і визначення мінімально достатньої тривалості цього імпульсу. За початковий момент подачі U_s , була взята затримка від старту імпульсу магнітного поля, що дорівнює 100 мс. У цій точці пригнічення було досягнуто при тривалості імпульсу пригнічення, що дорівнює $\tau_i=1$ с. Поступово зменшували його тривалість, і досягли мінімального значення $\tau_i=10$ мс, при якому пригнічення потоку ЕУ ще спостерігалось. Далі зсували імпульс пригнічення (зберігаючи його тривалість) по фронту імпульса струму магнітного поля. Автори прийшли до висновку, що подача такого імпульсу напруги що пригнічує на антену - електрод до моменту включення ВЧ імпульсу, що створює плазму, дозволяє здійснити пригнічення потоку ЕУ.

Імпульс напруги пригнічення подавався тільки за наявності градієнта магнітного поля, оскільки на рівній ділянці (столі) ЕУ не утворюються. Аналізуючи отримані результати, було висунуто припущення, що тривалість імпульсу пригнічення має несуттєве значення. Тому, що в схемі присутній конденсатор фільтра C_f (Рис. 4.7), який спочатку заряджається напругою імпульсу пригнічення, а потім відбувається його розряд при виникненні потоку ЕУ. Для перевірки цього припущення зробили наступне. Приблизно за 1 секунду до старту імпульсу магнітного поля, на антену, а значить і на конденсатор фільтра подавали негативний імпульс постійної напруги амплітудою 50 В. Тривалість імпульсу порядку 10-30 мс. Таким чином, було здійснено заряд конденсатора фільтра C_f до рівня напруги пригнічення U_s до моменту подачі імпульсу магнітного поля. Потім джерело напруги, що

пригнічує, відключалося. І ефект пригнічення ЕУ також був досягнутий, але вже шляхом використання тільки енергії заряду конденсатора. В цьому експерименті були відсутні будь-які інші джерела створення потенціалу пригнічення на антені-електроді, тому була виключена можливість впливу їх внутрішнього опору на процес пригнічення ЕУ.

Після проведення цього етапу експериментів з'явилася можливість оцінити енергію, необхідну для пригнічення потоку ЕУ. Як відомо, енергія конденсатора дорівнює $E = C \cdot U^2 / 2$. При напрузі пригнічення в 50 В (при якому досягалось пригнічення), енергія, що запасав конденсатор фільтра $E_c = 12,5 \cdot 10^{-6}$ Дж, а при напрузі 25 В, при якому пригнічення не досягалось, $E_c = 3,125 \cdot 10^{-6}$ Дж. Таким чином, було висунуто припущення, що для пригнічення потоку ЕУ, що виникає в установці Ураган-2М, необхідна енергія пригнічення складає близько $12,5 \cdot 10^{-6}$ Дж [149, 151].

4.4 Вплив потоку ЕУ на параметри плазми

Була зроблена перевірка впливу пригнічення ЕУ на плазму за ступенем інтенсивності випромінювання видимого світла від розряду в камері.

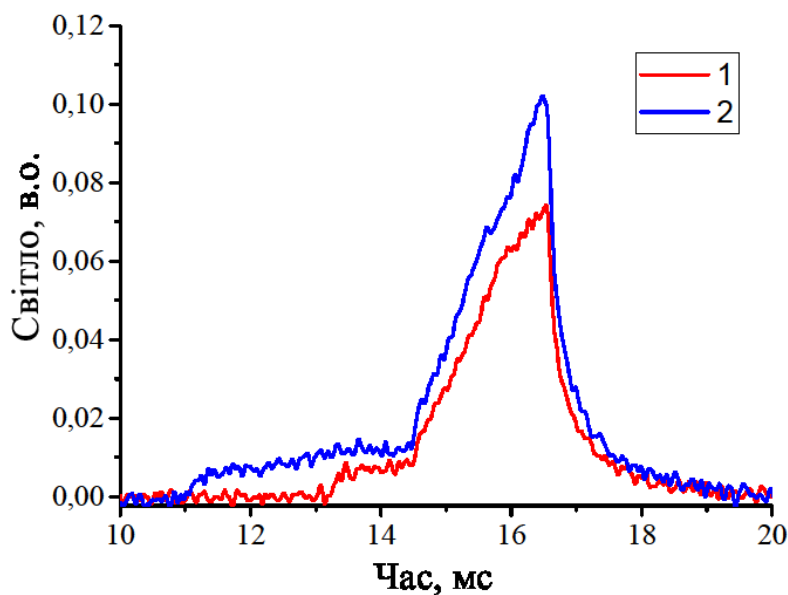


Рис. 4.8 Випромінювання видимого світла від розряду в камері. 1-з включеним потенціалом пригнічення, 2-без потенціалу пригнічення [151]

На рис. 4.8 наведено графіки інтенсивності випромінювання у видимому діапазоні частот від плазми в камері установки Ураган-3М. Видно, що при накладанні потенціалу пригнічення U_s , інтенсивність випромінювання дещо зменшується (на 10-15%) у порівнянні зі звичайним режимом без пригнічення. Це може свідчити про вплив напруги пригнічення потоків ЕУ на розряд робочого газу у вакуумній камері установки.

Для уточнення цього впливу було проведено порівняння вимірювань інтенсивності випромінювання спектральної лінії водню H_α (довжина хвилі 6562,85 Å), і рентгенівського випромінювання плазми при наявності потоку ЕУ і в його відсутність.

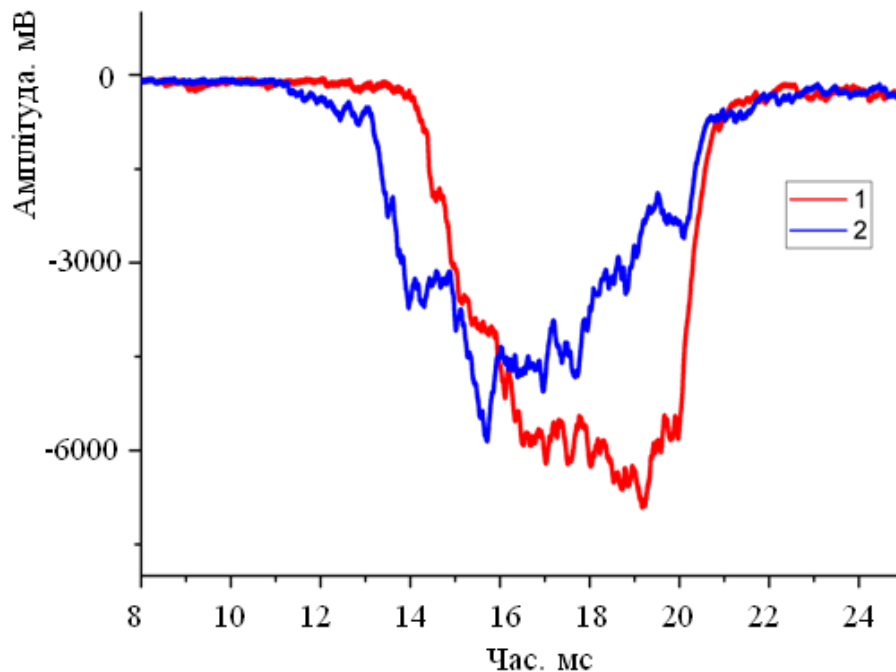


Рис. 4.9 Інтенсивність випромінювання спектральної лінії водню H_α (6562,85 Å). 1-з включеним потенціалом пригнічення, 2-без потенціалу пригнічення [151]

Виміри проводилися детектором з інтерференційним фільтром, розташованим перпендикулярно щодо плазмового шнуру. Була помічена

затримка сигналу випромінювання лінії водню H_α (тобто затримка початку пробою робочого газу) при підключеному потенціалі пригнічення приблизно на 1 мс при цьому - рівень сигналу H_α збільшувався. (рис. 4.9).

Також була виміряна залежність впливу режиму пригнічення ЕУ на інтенсивність м'якого рентгенівського випромінювання (рис. 4.10). З рисунка 4.10 видно, що сигнал м'якого рентгенівського випромінювання з плазми, який побічно можна пов'язати з її температурою, при наявності потоку ЕУ приблизно в 2 рази вище, ніж в разі пригнічення цього потоку. Це також може свідчити про вплив потоку ЕУ на процеси в плазмі.

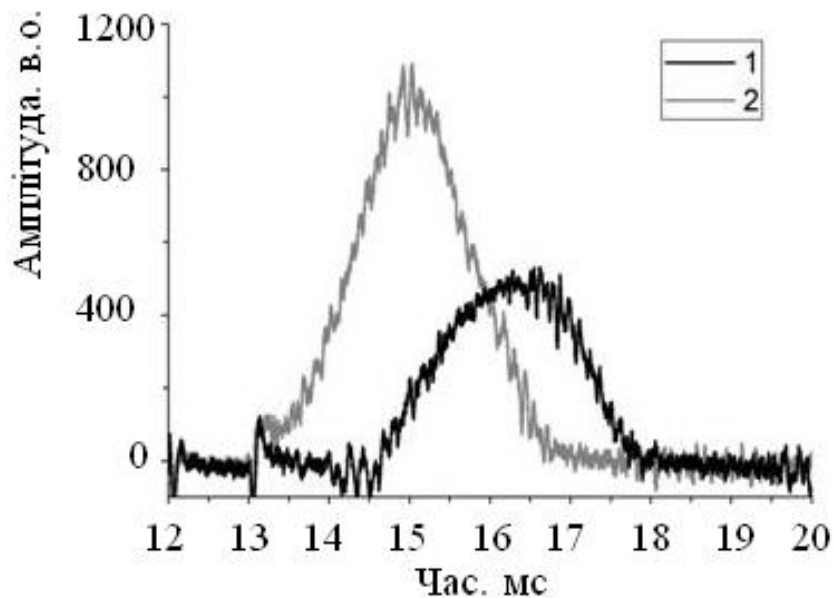


Рис. 4.10 Інтенсивності випромінювання м'якого рентгена. 1-з включеним потенціалом пригнічення, 2-без пригнічення [151]

При вивченні впливу напруги пригнічення U_s електронів утікачів на час пробою робочого газу (часу затримки холостого ходу (t_{0-s}) ВЧ генератора) (рис.4.11) ми далі говоримо про час холостого ходу ВЧ генератора тому, що цей параметр дуже важливий для забезпечення безпечної роботи всього ВЧ силового тракту. Так як за відсутністю пробою робочого газу всі силові елементи: елементи контуру ВЧ генератора, лінія передачі, узгоджувальний пристрій і антенні виводи знаходяться під високою ВЧ напругою і в лінії

передачі виникає в цей момент стояча хвиля великої амплітуди. Всі ці фактори можуть призвести до виникнення ВЧ пробоїв і виходу обладнання з ладу.

Також було виявлено наступне. При здійсненні подачі на антену-електрод напруги пригнічення U_s , яка дорівнює 100 В, відбувається збільшення часу затримки створення плазми t_{0-s} —часу холостого ходу ВЧ джерела (рис. 4.11).

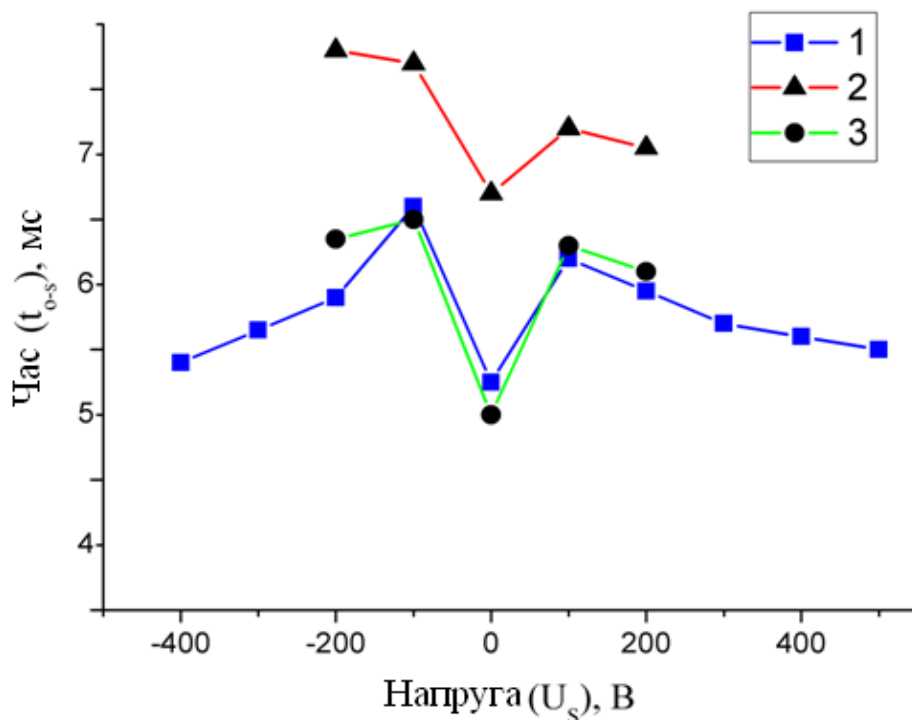


Рис. 4.11 Залежність часу пробою робочого газу (затримки холостого ходу- t_{0-s} ВЧ генератора) від величини прикладеного потенціалу пригнічення і від тиску в робочій камері. 1- $P=0,957 \cdot 10^{-3}$ Па, 2- $P=1,1 \cdot 10^{-3}$ Па, 3- $P=0,71 \cdot 10^{-3}$ Па [151]

При подальшому збільшенні U_s до 500 В, відбувається поступове зменшення цієї затримки. Причому видно, що графік залежності часу затримки пробою робочого газу практично симетричний при зміні полярності напруги пригнічення. Звичайно, на час холостого ходу впливає

також і тиск робочого газу в камері. Однак, характер поведінки кривих при різних значеннях тиску практично однаковий [151,152].

4.5 Стимулювання потоків ЕУ в стелараторі з імпульсним магнітним полем

Як вже говорилося вище, на стелараторі Ураган-3М був потрібний режим попередньої іонізації. І він був реалізований за допомогою ВЧ джерела електромагнітного поля. Також можливо домогтися попередньої іонізації робочого газу за допомогою посилення потоку ЕУ, що виникає на фронтах імпульсу магнітного поля.

У стелараторах основним джерелом, що породжує ЕУ, як правило, є омичне нагрівання. Однак, в разі імпульсного магнітного поля в замкнутій магнітній пастці, зміни величини поля на фронті і спаді також можуть викликати потоки ЕУ. Це і спостерігалось на стелараторах Ураган (див. вище) і також на стелараторі TJ-II. Тут доречно згадати, що ще в 1991 році А. В. Гуревич зі своїми колегами подали ідею використання електронів-утікачів для здійснення пробую газу в атмосфері. Для здійснення впевненого пробую робочого газу в стелараторах з імпульсним магнітним полем необхідно створити стабільний потік електронів в слабкому (наростаючому) магнітному полі установки, тобто здійснити його стимулювання. З цією метою можна використовувати ВЧ джерела енергії різної частоти. Або змінюючи умови для виникнення електронів за допомогою зміни тиску робочого газу. На стелараторі Ураган-3М були проведені експерименти з вивчення можливості впливу на потоки ЕУ зміною різних параметрів експерименту.

У стелараторах Ураган датчиками м'якого рентгенівського випромінювання було зафіксовано гальмівне випромінювання електронів, що утікають. Можливою його причиною може служити розсіювання на вільному електроні окремого фотона. Воно отримало назву комптонівського

розсіювання. Інтенсивність потоку частинок, породжених цим розсіюванням, визначає здатність іонізації робочого газу.

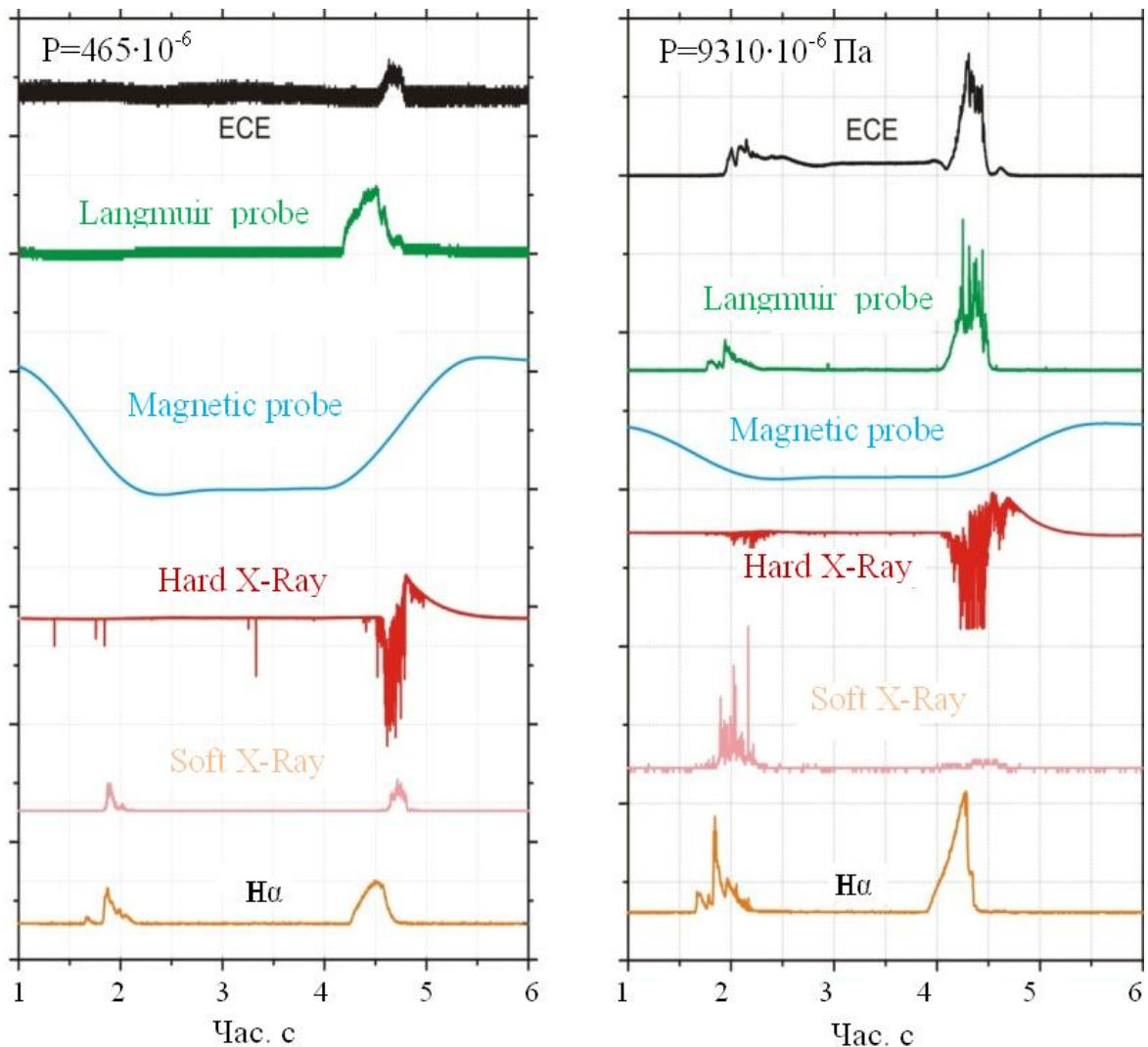


Рис. 4.12 Зміни сигналів ЕСЕ, ленгмюрівського зонда, жорсткого і м'якого рентгенівського випромінювання і H_{α} від тиску робочого газу [149]

При вивченні впливу тиску робочого газу було виявлено зміну сигналів ЕСЕ, ленгмюрівського зонда, жорсткого і м'якого рентгенівського випромінювання і H_{α} . На рисунку видно, що при низькому тиску (рис. 4.12-зліва) потік ЕУ існує не тільки на краях імпульсів магнітного поля, а й під час фази стаціонарного магнітного поля.

При більш детальному вивченні впливу тиску робочого газу в діапазоні 10^{-3} Па на потоки ЕУ було виявлено навіть роздвоєння імпульсу рентгенівського випромінювання при тиску $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. На рис. 4.13

показаний такий подвійний імпульс рентгенівського випромінювання на задньому фронті імпульсу магнітного поля і його динаміка при зміні тиску робочого газу.

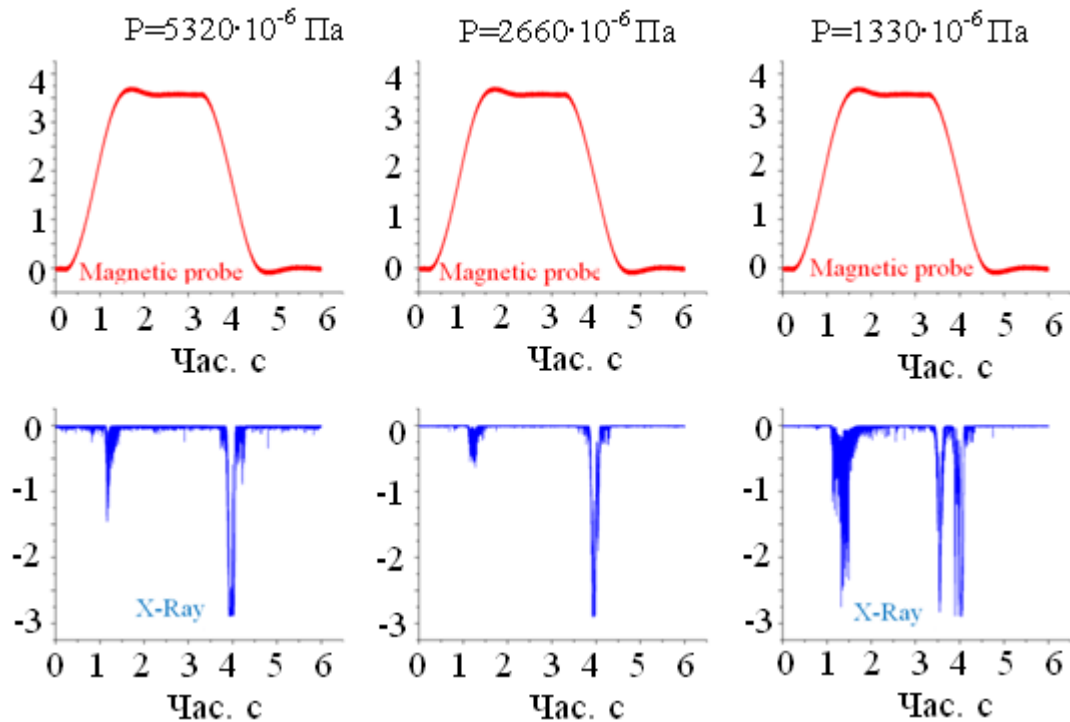


Рис. 4.13 Сигнали жорсткого рентгенівського випромінювання (внизу) на фронтах магнітного поля (вгорі) в залежності від тиску робочого газу [149]

При самостійному народженні ЕУ відбувається іонізація робочого газу і виникає плазма, яка потім сама є джерелом прискорених частинок. Для посилення потоку ЕУ було вирішено збільшити кількість частинок на стадії утворення плазми.

Для цієї мети використовувався додатковий розряд, який створюється за допомогою НВЧ-генератора на частоті 2,45 ГГц, потужністю 0,5–1 кВт, що включається в момент досягнення магнітного поля величини 0.8 кЕ (електронно-циклотронний резонанс) на час від 50 мс до 1000 мс. При цьому створювалася плазма з густиною близько $N_e = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Імпульс НВЧ випромінювання переміщався по фронту магнітного поля, і змінювалася його тривалість (рис. 4.14).

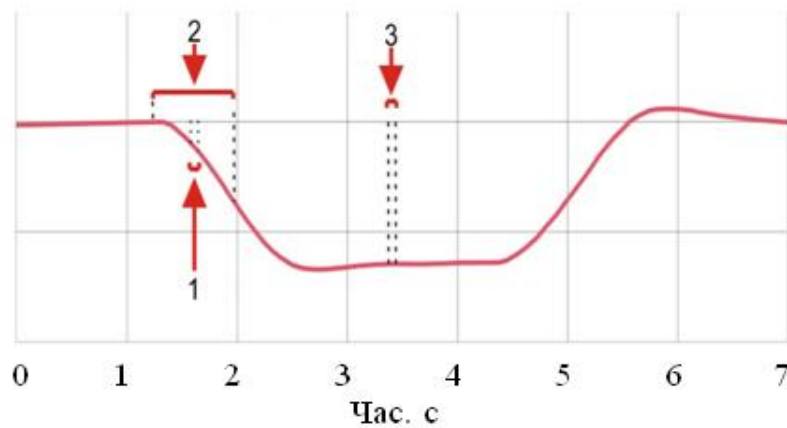


Рис. 4.14 Стимуляція електронів утікачів ВЧ і НВЧ стимулюючими імпульсами на фронті магнітного поля. 1—стимулюючий імпульс, 2—зміна часу включення стимулюючого імпульсу, 3—основний ВЧ імпульс [153]

Іонізація робочого газу потоком електронів втікачів, стимульована додатковою інжекцією плазми під час зародження потоку ЕУ, залежить від інтенсивності потоку частинок.

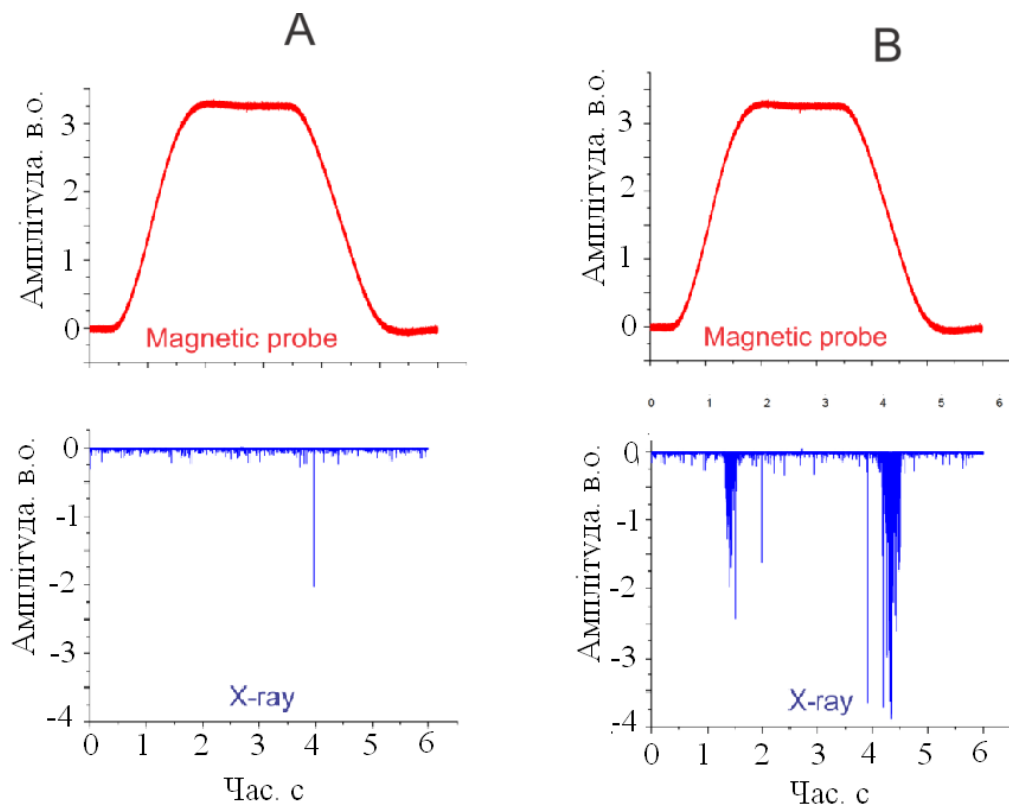


Рис. 4.15 Вплив ВЧ імпульсу на зародження ЕУ (А-без ВЧ стимуляції, В-з ВЧ стимуляцією) [149]

Цей потік залежить від тривалості і амплітуди НВЧ - імпульсу, за допомогою якого створюється плазма в зоні утримання.

Для того, щоб здійснювався електронно - циклотронний резонанс на частоті 2,45 ГГц і відповідного магнітного поля необхідна оптимальна затримка початку НВЧ-імпульсу відносно початку фронту імпульсу магнітного поля. Проводилось стимулювання потоку ЕУ і ВЧ імпульсом.

Результати цих експериментів зображені на рис. 4.15. Як видно з графіків, ВЧ стимулюючий імпульс на фронті магнітного поля забезпечує підсилення потоку ЕУ як на спаді цього поля, так і на його фронті.

На рис 4.16 зображена залежність інтенсивності потоку ЕУ від 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 основною пробою.

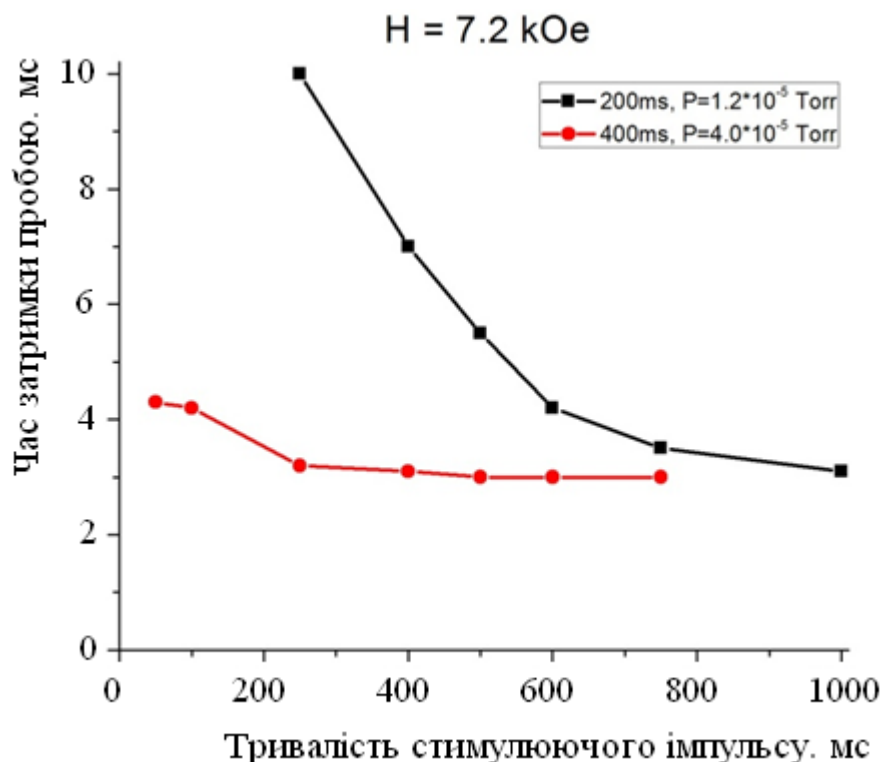


Рис. 4.16 Залежність затримки пробою (або часу холостого ходу) від тривалості і затримки імпульсу-стимулятора ($H=7.2$ kOe, $p=1.6 \cdot 10^{-3}$ Па) [149]

Це може говорити на користь того, що заздалегідь створені електрони розрядом-стимулятором, потім багаторазово збільшують кількість породжуваних електронів магнітним полем. Причому, в такому режимі час затримки пробою практично не залежить від тривалості імпульсу-стимулятора. В той час, як при малій величині часу між імпульсом-стимулятором і стартом магнітного поля спостерігається помітна залежність часу пробою від тривалості імпульсу-стимулятора. Видно, що зі збільшенням його тривалості час затримки пробою скорочується.

Оцінки проводилися при порівнянні параметрів імпульсу і результатів його впливу у вигляді часу затримки пробою щодо початку ВЧ-імпульсу генератора Каскад-1, що створює основний розряд.

Таким чином, було виявлено, що при стимулюванні формування плазми в області утримання на стадії зародження і прискорення заряджених частинок (на передньому фронті імпульсу магнітного поля) досягається підсилення потоку ЕУ. На його величину впливають параметри плазми і час інжекції, що опосередковано можна визначити через тривалість і амплітуду імпульсів ВЧ і СВЧ генераторів - стимуляторів. Величина потоку електронів втікачів залежить також від затримки імпульсу генератора-стимулятора щодо початку імпульсу магнітного поля. При порівнянні ефективності впливу ВЧ і НВЧ джерел-стимуляторів було визначено, що 100 кВт імпульс ВЧ джерела виробляв такий же ефект посилення потоку електронів втікачів, як 1,5 кВт НВЧ джерело плазми [149,153].

Висновки по розділу 4

1. Розроблений новий спосіб управління потоками ЕУ в стелараторі шляхом накладення постійного потенціалу на антену-електрод. Експериментальна перевірка способу на стелараторі Ураган - 3М показала, що при поданні на антену-електрод напруги негативної полярності ($U_s \geq -100$ В)

рентгенівське і електроно-циклотронне випромінювання відсутні, тобто відбувається зрив потоку ЕУ. Це пояснюється дією постійного електричного поля в місці розташування електроду на пролітаючі електрони. Вони захоплюються полем антени-електрода і не беруть участь у створенні лавинного пробоя робочого газу

2. При проведенні експериментів на стелараторі Ураган-2М також був досягнутий ефект пригнічення потоку ЕУ при поданні на антену-електрод негативного потенціалу від 20 В до 100 В. На цій установці пригнічення ЕУ зафіксоване також і при позитивній полярності замикаючої напруги. Це можна пояснити різною конфігурацією магнітного поля в установках і іншим просторовим розташуванням ВЧ антен-електродів по відношенню до траєкторій потоків ЕУ, що зароджуються. Передбачається, що рівень пригнічуючого потенціалу електроду залежить від його розмірів, розташування в камері і від величини магнітного поля, що створює електронний потік.

3. При дослідженні впливу режиму пригнічення ЕУ накладенням постійного потенціалу було виявлено наступне. При здійсненні подання на антену - електрод напруги пригнічення U_s , яка дорівнює 100 В, відбувається збільшення часу затримки створення плазми-часу холостого ходу ВЧ генератора. При подальшому збільшенні U_g до 500 В, відбувається поступове зменшення цієї затримки.

4. Проведено стимулювання потоку електронів втікачів ВЧ і НВЧ імпульсами на фронті магнітного поля. Показана залежність інтенсивності потоку ЕУ від тиску робочого газу в камері установки і від тривалості імпульсу - стимулювання та його затримки по відношенню до моменту старту магнітного поля.

5. Вивчено вплив стимулювання потоку ЕУ додатковими ВЧ і СВЧ розрядами на передньому фронті імпульсу магнітного поля. Помічено, що такі розряди на стадії зародження і прискорення заряджених частинок сприяють підсиленню потоку ЕУ.

Результати досліджень даного розділу наведено у публікаціях здобувача [146], [148], [149], [150], [151], [152], [153].

ВИСНОВКИ

Отримані дані щодо взаємодії ВЧ джерел електромагнітних полів з плазмою в тороїдальних установках Ураган чітко показують, що для рамкової антени існує діапазон, як величин магнітного поля так і тиску робочого газу, де зв'язок антени з плазмою максимальний, та, отже, вводиться в плазму максимальна ВЧ потужність. Це дозволяє оптимізувати планування та проведення експериментальних компаній на установках Ураган. Виявлення вищих гармонік в антені, обумовлених впливом плазми, спричиняє підвищену увагу до узгодження навантажень ВЧ джерела з плазмою для забезпечення введення в плазму ВЧ потужності заданої частоти.

Дослідження очищення вакуумної камери за допомогою безперервного УКВ розряду виявило перспективність даного методу, особливо для установок з надпровідними котушками магнітного поля. Вивчення поєднання такого розряду з імпульсними розрядами дозволило визначити режими з більшою інтенсивністю очищення. Ці дані важливі для планування і проведення очищення вакуумних камер у нових установках, наприклад, Wendelstein-7X. Вони відкривають перспективу в розробці нових більш ефективних методів очищення вакуумних камер, як у термоядерних установках, так і в технологічних.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі основні висновки:

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 очистка 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 пригнічення ЕУ від тиску робочого газу та від величини напруги пригнічення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.З. Амелин, В.Е. Быков, Е.Д. Волков та ін. в: *Материалы Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов*, (Ленинград, 1977), т.1, с. 90-97.
2. Е.Д. Волков и др. *Основные физические задачи установки «Ураган-3»* (Препринт ХФТИ, Харьков 1981, № 81-45), с. 28.
3. A. Iiyoshi, S. Imagawa, and LHD group, “Design, construction and the first plasma experiments in the Large Helical Device”, *Fusion Engineering and Design*. **46**, 323–335 (1999).
4. O. Motojima, N. Yanagi, and A. Nishimura, “Review of SC magnet technologies developed in LHD project,” *Journal of Nuclear Materials*. **258–263**.(Part 1), 234–240 (1998).
5. Mito Toshiyuki, Nishimura Arata, Yamada Shuichi et al., “Operational Status of the Superconducting System for LHD,” *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. **13** (2), 1464-1467 (2003).
6. V.S. Udintsev, G. Taylor, H.K.B. Pandya et al., “Engineering aspects of design and integration of ECE diagnostic in ITER,” *EPJ Web of Conferences*. **87**, 03006 (2015).
7. ITER Physics Basis Editors, ITER Physics Expert Group Chairs and Co-Chairs and ITER Joint Central Team and Physics Integration Unit. *ITER Physics Basis*, *Nucl. Fusion*. **39** (12). 2579 (1999).
8. L. Oren, R.J. Taylor, “Trapping and removal of oxygen in tokamaks,” *Nucl. Fusion*. **V. 17** (6), 1143 (1977).
9. M.R. Winchester, R. Payling, G.L. Jackson, et al., “A *Critical Review*” *Spectrochimica Acta. Part B*. **59** ,607–666 (2004)
10. V. Philipps “*Wall conditioning on TEXTOR*,” *Fusion Science and Technology*. **47**, 119 – 125, (2005).
11. Y. Sakamoto, Y. Ishibe, K. Yano et al., “*Electron cyclotron resonance discharge cleaning of JFT-2 Tokamak (Jaeri)*,” *J. Nucl. Mater.* **93-94**. 333-337. (1980).

12. Y. Sakamoto, Y. Ishibe, S. Ishii et al., “*ECR discharge cleaning experiment in the JIPP T-II*,” J. Nucl. Mater. **111-112**, 485-488. (1982).
13. D. Douai, A. Lysoivan, V. Philipps et al., “*Recent results on Ion Cyclotron Wall Conditioning in mid and large size tokamaks*,” Journal of Nuclear Materials. - **415** (1), S1021-S1028 (2011).
14. A. Lysoivan, R. Koch, D. Douai et al., “*ICRF physics aspects of wall conditioning with conventional antennas in large-size tokamaks*,” Journal of Nuclear Materials. **415** (1), S1029–S1032 (2011).
15. B. Unterberg, R. Laengner, A. Lysoivan et al., “*Electron density and temperature measurements in TEXTOR ion cyclotron wall conditioning plasmas by thermal Li beam spectroscopy*,” Journal of Nuclear Materials. **415** (1), S1166-S1169 (2011).
16. A. Kreter, C. Schultz, V. Phillips et al., “*Fuel removal from castellated structures by plasma discharges in reactive gases*,” Journal of Nuclear Materials. **415** (1), S1-S1246, S781-S784 (2011).
17. A. Tankut, G. Vlasses, K.E. Miller et al., “*Wall conditioning in TCSU and its effect on plasma performance*,” Journal of Nuclear Materials. **415** (1), S1037-S1041 (2011).
18. J. Li, M. Shimada, J. Hu et al., “*Wall conditioning towards utilization in ITER*,” Journal of Nuclear Materials. **415**(1), S35-S41 (2011).
19. J.S. Hu, “*Oxidation wall conditioning on HT-7 and EAST superconducting tokamaks*,” Journal of Nuclear Materials. **415**(1), S1054-S1057 (2011).
20. Б.Н. Колбасов, “*19-я международная конференция по взаимодействию плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза*” ВАНТ. сер. термоядерный синтез. **4**, 48-69 (2010).
21. X.J. Zhang, Y.P. Zhao, B.N. Wan et al., in: *23rd IAEA Fusion Energy Conference*. (IAEA, Daejeon. Republic of Korea, 2010), p. 254.
22. Steinmetz, K., Wesner, F., Niedermeyer, H. et al., “*Ion cyclotron resonance heating in the divertor tokamak ASDEX*”, J. Vac. Sci. Technol. **A 4**, 1088 (1986).

23. V. Bobkov, M. Balden, R. Bilato et al., “*ICRF operation with improved antennas in ASDEX Upgrade with W wall*”,/ Nuclear Fusion. **53**(9), 093018 (2013).
24. F. Hofmeister, F. Braun, F. Wesner, “The RF system and matching procedure for ASDEX and ASDEX upgrade”, Fusion Eng. and Design. **24**, 83-89 (1994).
25. A. V. Krasilnikov, D. Van Eester, E. Lerche et al., “*Fundamental ion cyclotron resonance heating of JET deuterium plasmas*”, Plasma Physics and Controlled Fusion. **51**(4), 044005 (2009).
26. J.-M. Noterdaeme, in: *Proceedings of ITC18*, (EURATOM, Garching, Germany, 2008), pp. 68-73.
27. A. Kaye, T. Brown, V. Bhatnagar et al., “*Present and future JET ICRF antenna*”, Fusion Engineering and Design. **24** (1-2), 1-21 (1994).
28. V. Riccardo, “*Engineering challenges of the JET ITER-like Wall*”, Journal of Nuclear Materials. **390**, 895–899 (2009).
29. M. Graham, M-L. Mayoral, I Monakhov et al., “*Implementation of load resilient ion cyclotron resonant frequency (ICRF) systems to couple high levels of ICRF power to ELMy H-mode plasmas in JET*”, Plasma Phys. Control. Fusion. **54**, 074011 (2012).
30. K. Saitoa, C. Takahashia, M. Yokota, “*Real-time impedance matching system for ICRF heating in LHD*”, Fusion Engineering and Design. **83** (2–3), 245–248 (2008).
31. S.T. Wu, W.Y. Wu, Y.F Bi, in: *IAEA, Vienna (Austria), Technical Committee meeting Steady-state Operation of Tokamak*, 1998
32. Steady state operation of tokamaks. *Proceedings of a Technical Committee meeting held in Hefei, China*, (IAEA, Vienna, 1998), p. 49-62
33. D.W. Swain, R.H. Goulding, “*ITER ion cyclotron system: Overview and plans*”, Fusion Engineering and Design. **82**, 603–609 (2007).
34. D. Bora, A. Mukherjee, ITER-India RF Team, in *24th Symposium on Fusion Technology*, (Warsaw, Poland. 2006), pp. P3-B-380.

35. J. Hosea, C. Brunkhorst, E. Fredd et al., in: *21-th Symposium on Fusion Engineering* (Princeton Plasma Physics Laboratory, Knoxville, Tennessee USA, 2005), pp. 411226.
36. Son-Jong Wang Jong-Gu Kwak Young-Dug Bae et al., “*Distributed Control System For Kstar Icrf Heating*”, Nuclear Engineering And Technology. **41(6)**, 807-812 (2009).
37. Jong-Gu Kwak, S.J. Wang, J.S. Yoon et al., “*Achievement of 1.9 MW for 300 s during the commissioning of the KSTAR ICRF transmitter*”, Fusion Engineering and Design. **84(7-11)**, 140-143 (2009).
38. Francesco Mirizzi, Alessandro Bruschi, Alessandro Cardinali et al., “*The three RF additional heating systems for FAST*”, Fusion Engineering and Design. **84(7-11)**, 1313–1316 (2009).
39. Raghuraj Singh, Aparajita Mukharjee, D.S. Bhattacharya et al., “*Design and testing of 200 kW/91.2 MHz RF amplifier*”, Fusion Engineering and Design. 82(5-14). 853–859 (2007).
40. J. Nührenberg, W. Lotz, P. Merkel et al., “*Overview of Wendelstein 7-X Theory*”, Trans. Fusion Technology. **27**, 71 (1995).
41. R.C. Wolf, the Wendelstein 7-X Team, “*A stellarator reactor based on the optimization criteria of Wendelstein 7-X*”, Fusion Eng. Design. 83(7-9), 990 – 996 (2008).
42. J. Ongena, A. Messiaen, P. Dumortier et al., in: *AIP Conference Proceedings*. **1580(1)**, 105-112 (2014).
43. V.E. Moiseenko, A.A.Beletskii, A.M. Shapoval, et.al., “*A scenario of pulsed ECRH wall conditioning in hydrogen for the Wendelstein 7-X helias*”, Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. **1**, 37-40 (2019).
44. V.E. Moiseenko, G.P. Glazunov, A.V. Lozin, A.L. Konotopskiy, D.I. Baron, A.A. Beletskii, M.N. Bondarenko, V.V. Chechkin, M.B. Dreval, L.I. Grigor’eva, M.M. Kozulya, S.M. Maznichenko, Yu.K. Mironov, R.O. Pavlichenko, V.S. Romanov, A.N. Shapoval, V.B. Korovin, V.G. Konovalov, N.V. Zamanov, E.V. Turianska, Yu.S. Kulyk, T. Wauters, A.I. Lyssoivan, O. Ågren, I.E. Garkusha and

- Uragan-2M Team, “*Stellarator research at IPP KIPT: status and prospects*”, Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. **1**, 3-8 (2019).
45. T. Wauters, A. Alonso, A. Gorlaev et al. “*Wall conditioning throughout the first carbon divertor campaign on Wendelstein 7-X*”, Nucl. Mat. And Energy. **17**, 235 (2018).
46. Yu.S. Kulyk, V.E. Moiseenko, T. Wauters et al. “*Radio-frequency wall conditioning for steady-state stellarators*”, Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. **6** (22), 56 (2016).
47. Shvets O.M., Dikij I.A, Kalinichenko S.S., et al., “*Absorption of Alfvén waves and plasma production in the OMEGA and URAGAN-3 toroidal devices*”, Nucl. Fusion. **26**, 23-41 (1986).
48. Chechkin V.V., Grigor’eva L.I., Smirnova M.S., et al., “*Plasma heating effects on divertor flow vertical asymmetries in the Uragan-3M torsatron*”, Nucl. Fusion. **42**, 1175-1182 (2002).
49. Чечкин В.В., Григорьева Л.И., Павличенко Р.О. и др., “*Особенности развития ВЧ-разряда, создаваемого рамочной антенной, в торсатроне “Ураган-3М”*”, Физика плазмы. Т. 40(8), 697 (2014).
50. И.Л. Тажибаева, Э.А. Азизов, В.А. Крылов та ін., в *Міжнародний семінар*. (НЯЦ Республіки Казахстан, Астана – Курчатов, 2005), с 136.
51. Тажибаева И.Л., Батырбеков Э.Г., Скаков М.К., в: *IV Международная научно-техническая конференция инновационные проекты и технологии ядерной энергетики*, (IV ISTC NIKIET, Moscow, 2016), 219-220.
52. V.S. Vlasenkov, V.M. Leonov, V.G. Merezkin et al., “*The runaway electron discharge regime in the tokamak-6 device*”, Nuclear Fusion. **13**(4), 509 (1973).
53. R.D. Gill, “*Generation and loss of runaway electrons following disruptions in JET*, // Nuclear Fusion. **33**(11), 1613 (1993).

54. V.V. Plyusnin, V. Riccardo, R. Jaspers et al., “*Study of runaway electron generation during major disruptions in JET*”, Nuclear Fusion. **46**(2), 277 (2006).
55. M. Lehnen, S.S. Abdullaev, G. Arnoux et al., “*Runaway generation during disruptions in JET and TEXTOR*”, Journal of Nuclear Materials. **390391**(0). 740 - 746 (2009).
56. G. Arnoux, B.Bazylev, M.Lehnen et al., “*Heat load measurements on the jet first wall during disruptions*”, Journal of Nuclear Materials. 415(1), S817 - S820 (2011).
57. R. Yoshino, Y. Neyatani, N. Hosogane et al., “*The softening of current quenches in jt-60u*”, Nuclear Fusion. V. **33**(11), 1599 (1993).
58. R. Yoshino, S. Tokuda, and Y. Kawano, “*Generation and termination of runaway electrons at major disruptions in jt-60u*”, Nuclear Fusion. **39**(2), 151 (1999).
59. F. Saint-Laurent, C. Reux, J. Bucalossi et al., in: *Proceedings of the 36th EPS Conf. on Plasma Physics*, (ECA, 2009), **33E**. pp. 4, 205.
60. F. Saint-Laurent, C. Reux, S. Bremond et al., in: *Proceedings of the 38th EPS Conf. on Plasma Physics*, (EPS, Strasbourg, France, 2011), pp. 118, 2011.
61. K.H. Finken, J.G. Watkins, D. Rusbltdt et al., “*Observation of infrared synchrotron radiation from tokamak runaway electrons in textor*”, Nuclear Fusion. **30**(5), 859 (1990).
62. M. Lehnen, S. Bozhenkov, S. Abdullaev et al., “*Suppression of runaway electrons by resonant magnetic perturbations in textor disruptions*, Phys. Rev. Lett. **100**, 255003 (2008).
63. E.M. Hollmann, P.B. Parks, D.A. Humphreys et al., “*Effect of applied toroidal electric field on the growth/decay of plateau-phase runaway electron currents in DIII-D*”, Nuclear Fusion. **51**(10), 103026 (2011).
64. N. W. Eidietis, N. Commaux, E. M. Hollmann et al., “*Control of post-disruption runaway electron beams in DIII-D*”, Physics of Plasmas. 19, 056109 (2012).

65. E.M. Hollmann, M.E. Austin, J.A. Boedo et al., “*Control and dissipation of runaway electron beams created during rapid shutdown experiments in DIII-D*,” Nuclear Fusion. **53**(8), 083004 (2013).
66. B. Esposito, J. R. Martn-Sols, F. M. Poli et al., “*Dynamics of high energy runaway electrons in the Frascati tokamak upgrade*,” Physics of Plasmas. **10**(6), 2350 (2003).
67. E.D. Fredrickson, M.G. Bell, G. Taylor et al., “*Control of disruption-generated runaway plasmas in TFTR*,” Nuclear Fusion. **55**(1), 013006 (2015).
68. M.N. Rosenbluth and S.V. Putvinski, “*Theory for avalanche of runaway electrons in tokamaks*,” Nuclear Fusion. **37**(10), 1355 (1997).
69. T.C. Hender, J.C. Wesley, J. Bialek, et al., “*Disruption, the ITPA MHD, and Magnetic Control Topical Group. Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions*,” Nuclear Fusion. **47**(6), S128 (2007).
70. M. Lehnen, A. Alonso, G. Arnoux et al., “*Disruption mitigation by massive gas injection in JET*,” Nuclear Fusion. **51**(12), 123010 (2011).
71. E.M. Hollmann, T.C. Jernigan, M. Groth et al., “*Measurements of impurity and heat dynamics during noble gas jet-initiated fast plasma shutdown for disruption mitigation in DIII-D*,” Nuclear Fusion. **45**(9), 1046 (2005).
72. N. Commaux, L.R. Baylor, S.K. Combs et al., “*Novel rapid shutdown strategies for runaway electron suppression in DIII-D*,” Nuclear Fusion. **51**(10), 103001 (2011).
73. C. Reux, J. Bucalossi, F. Saint-Laurent et al., “*Experimental study of disruption mitigation using massive injection of noble gases on Tore Supra*,” Nuclear Fusion. **50**(9), 095006 (2010).
74. F. Saint-Laurent, G. Martin, T. Alarcon et al., “*Fire, a novel concept of massive gas injection for disruption mitigation in ITER: Validation on Tore Supra*,” Fusion Engineering and Design. **89**(12), 3022 – 3038 (2014).
75. V. Riccardo, A. Loarte and the JET EFDA Contributors, “*Timescale and magnitude of plasma thermal energy loss before and during disruptions in JET*,” Plasma Phys. Control. Fusion. **45**(11), A269 (2003).

76. P. Helander, L-G. Eriksson, F. Andersson, “*Runaway acceleration during magnetic reconnection in tokamaks*”, Plasma Phys. Control. Fusion. **44**, B247 (2002).
77. R. D. Gill, B. Alper, M. de Baar et al., “*Work programme. Behaviour of disruption generated runaways in JET*”, Nucl. Fusion. **42**(8), 1039 (2002).
78. Martin G et al. in: *22nd Eur. Physical Society Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion*, (Bournemouth, 1995), pp. II-041.
79. K.H. Finken, G. Mank, A. Krämer-Flecken et al., “*Mitigation of disruptions by fast helium gas puffs*”, Nucl. Fusion. **41**, 1651 (2001).
80. D. G. Whyte, T. C. Jernigan, D. A. Humphreys et al., “*Mitigation of Tokamak Disruptions Using High-Pressure Gas Injection*”, Phys. Rev. Lett. **89**, 055001 (2002).
81. M. Bakhtiari, H. Tamai, Y. Kawano et al., “*Study of Plasma Termination Using High-Z Noble Gas Puffing in the JT-60U Tokamak*”, Nucl. Fusion. **45**(5), 318 (2005).
82. E.M. Hollmann, T.C. Jernigan, M. Groth et al., “*Measurements of Impurity and Heat Dynamics During Noble Gas jet-Initiated Fast Plasma Shutdown for Disruption Mitigation in DIII-D*”, Nucl. Fusion. **45**(9), 1046 (2005).
83. R.S. Granetz, E.M. Hollmann, D.G. Whyte et al., “*Gas jet Disruption Mitigation Studies on Alcator C-Mod and DIII-D*”, Nucl. Fusion. **47**(9), 1086 (2007).
84. G. Pautasso, C.J. Fuchs, O. Gruber et al., “*Plasma shut-down with fast impurity puff on ASDEX Upgrade*”, Nucl. Fusion. **47**(88), 900 (2007).
85. S. A. Bozhnikov, M. Lehnen, K. H. Finken et al., “*Generation and Suppression of Runaway Electrons in Disruption Mitigation Experiments in TEXTOR*”, Plasma Phys. Control. Fusion. **50**, 105007 (2008).
86. S. A. Bozhnikov, K-H. Finken, M. Lehnen et al., “*Main Characteristics of the Fast Disruption Mitigation Valve*”, Rev. Sci. Instrum. **78**(3), 033503 (2007).
87. P. Helander, L-G Eriksson, F. Andersson, “*Suppression of Runaway Electron Avalanches by Radial Diffusion*”, Phys. Plasmas. **7**(10), 4106 (2000).

88. M. Lehnen, S.S. Abdullaev, G. Arnoux et al., “*Runaway generation during disruptions in JET and TEXTOR*”, Journal of Nuclear Materials. **390–391**, 740-746 (2009).
89. V.E. Moiseenko, "Plasma Density Radial Distribution During RF Preionization", Problems in Atomic Science and Techniques, Series Thermonuclear Fusion. **3**, 18 (1985).
90. D.C. Miljak, F.F. Chen, “*Helicon wave excitation with rotating antenna fields*”, Plasma Sources Sci. Technol. **7**, 61 (1998).
91. D.D. Blackwell, F.F. Chen, “*Time-resolved measurements of the electron energy distribution function in a helicon plasma*”, Plasma Sources Sci. Technol. **10**, 226 (2001).
92. J.J. Thompson, “*On the discharge of Electricity through exhausted tubes without electrodes*”, Phil. Mag. **32**(197), 321 (1891).
93. J Hopwood, “*Review of inductively coupled plasmas for plasma processing*”, Plasma Sources Sci. Technol. **1**, 109 (1992).
94. А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин и др., “*Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы*”, Прикладная физика, **4**, 70-74 (2005).
95. А. Ф. Александров, Н.Ф. Воробьев, Е.А. Кралькина и др., “*Теория квазистатических плазменных источников*”, ЖТФ. **64**(11), 53 (1994).
96. V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich, “*Electrical characteristics and electron heating mechanism of an inductively coupled argon discharge*”, Plasma Sources Sci. Technol. **3**, 169 (1994).
97. А. Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин и др., “*Самосогласованная модель ВЧ индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле*”, Физика плазмы. **30**(5), 434-449 (2004).
98. J.E. Stevens, *High Density Plasma Sources: Design, Physics and Performance*, (Park Ridge, New Jersey. Noyes Publ. – 1996). pp. 312-349.
99. K.P. Shamrai, A.F. Alexandrov, G.E. Bougrov at al., in: Proc 23-th intern. Conf. Phen. Ion. Gas, (Toulouse, 1997), p. 4365.

100. A.F. Alexandrov, G.E. Bougrov, E.A. Kralkina et al., in: *Proc. XXV Intern. Conf. Phen. Ion. Gas*, (. Nagoya, 2001).
101. Y. Sakawa, T. Takino, T. Shoji, “*Contribution of slow waves on production of high-density plasmas by $m=0$ helicon waves*”, *Phys. Plasmas*. **6**, 4759 (1999).
102. V. E. Moiseenko, Yu. S. Stadnik, A. I. Lysoivan and V. B. Korovin, “*Self - Consistent Modeling of Radio - Frequency Plasma*”, *Generation in Stellarators Plasma Physics Reports*. **39**(11), 873–881 (2013).
103. 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).
104. D. Bora, Sunil Kumar, Raj Singh et.al., “*Ion Cyclotron resonance heating system on Aditya*”, *Sadhana*, **30**(1), 21-43 (2005).
105. М.С. Нейман, *Курс радиопередающих устройств*, (М: Советское радио. 1957). С. 123-176.
106. V.B. Korovin, V.V. Filippov, M.M. Kozulya, E.D. Kramskoy, A.V. Lozin, in: *Alushta - International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, (NSC KIPT, Kharkiv, 2014), p. 48.
107. 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**, 41-43 (2014).
108. V.I. Tereshin, A.A. Beletskii, V.L. Berezhnyj et al., in: *35th EPS Conference on Plasma Phys*, (ECA, Hersonissos, 2008), p-1.061.
109. V.B. Korovin, Ye.D. Kramskoy, in: *Alushta- International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion* (NSC KIPT, Alushta, 2012), p.36.
110. G. Richard, “*Carter Radio-frequency power generation*,(CERN Yellow Report CERN, **001**, 45-70 (2013).
111. A.I. Lysojvan, V.E. Moiseenko, O.M. Shvets, K.N. Stepanov, “*Analysis of ICRF Plasma Production in Large-Scale Tokamaks*”, *Nuclear Fusion*. **32**, 1361 (1992).

112. В.Е. Моисеенко, Е. Д. Волков, В. И. Терёшин и Ю. С. Стадник, “Альфвеновский нагрев в торсатроне «УРАГАН-2М»”, Физика плазмы. **35**(10), 901-906 (2009).
113. V.E. Moiseenko, V.V. Plyusnin, A.I. Lyssoivan et al., in : *23rd EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys.*, (ITPh, Kyiv, Ukraine, 1996), p. 926.
114. Б.П. Асеев, *Колебательные цепи*, (Связьиздат, М. 1955), с. 124-126.
115. В.Б. Коровин, В.Е. Моисеенко, О.М. Швец, Авторское свидетельство СССР № 1366033 (24 Січень 1985).
116. Е.Д. Крамской, В.Б. Коровин, М.М. Козуля, “Мощный высокочастотный фидерный переключатель высокочастотных кабелей”, ПТЭ. **1**, 153-154 (2018).
117. Е.Д. Крамской, В.Б. Коровин, М.М. Козуля, “Мощная высокочастотная нагрузка”, ПТЭ. **1**, 155 (2018).
118. 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.
119. V.L. Berezhnyj, 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.
120. V.L. Berezhnyj, V.V. Filippov, I.V. Berezhnaya, “Analysys of antenna RF current in the torsatron U-2”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **6**, 8-11 (2014).
121. А.Ф. Александров, К.В. Вавилин, Е.А. Кралькина и др., “Особенности индуктивного ВЧ разряда низкого давления. 1. Эксперимент”, Физика плазмы. **33**(9), 802-815 (2007).
122. М.М. Kozulya, E.D. Kramskoy, V.B. Korovin, A.B. Evsukov, A.A. Kasilov, A.V. Lozin, V.E. Moiseenko, L.I. Grigor`eva, A.E. Kulaga, S.M. Maznichenko, Yu.K. Mironov, R.O. Pavlichenko, V.S Romanov., V.V. Chechkin, N.V. Zamanov and Uragan 3-M team, “Creation Of Low Density Starting Plasma With Small

Frame antenna At Uragan-3M device”, Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Physics. **1**, 59-61 (2015).

123. А. В. Лозин, В. Е. Моисеенко, Л. И. Григорьева, М. М. Козуля, А. Е. Кулага, А. И. Лысойван, Ю. К. Миронов, Р. О. Павличенко, В. С. Романов, В. Я. Чернышенко, В. В. Чечкин и команда торсатрона "Ураган-3М" *Очистка внутренних вакуумных поверхностей установки "УРАГАН-3М" ВЧ-разрядами*”, Физика Плазмы. **39**(8), 704-711 (2013).

124. A. Sagara, et al., “*Wall Conditioning at The Starting Phase of LHD*”, NIFS (Natl Inst Fusion Sci). **586**, 263-267 (1999).

125. Л.Н. Розанов, *Вакуумная техника*. (Высшая школа. М. 1990), с. 121, 128-130, 173-175.

126. A. Jose, Ferreira and Francisco L. Tabarés, “*Cryo-trapping assisted mass spectrometry for the analysis of complex gas mixtures*”, Journal Of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, And Films. **25**, 246 (2007).

127. 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).

128. 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: *Alushta- International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion*, (NSC KIPT, Kharkiv, 2014), p.49.

129. В.Б. Коровін, В.Є. Моїсеєнко, Патент України № 106462 (26 Серпень, 2014).

130. Б.В. Кацнельсон, А.С. Ларионов, А.М. Калугин, *Электровакuumные и ионные приборы. Справочник*, (Энергия, М., 1970), с. 336.

131. М.В. Вамберский, В.И. Казанцев, С.А. Шелухин, *Передающие устройства СВЧ*, (Высшая школа, Москва, - 1984), с. 445.

132. 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. Войцень, І.Є. Гаркуша, в: *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу*, (ІТФ, Київ, 2013), с. 29.

133. 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 with use of high vacuum cryogenic trap*”, Problems of Atomic Science and Technology. **1**(95), 53-55 (2015).

134. 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.

135. 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 Fusion*. (NSC KIPT, Alushta, 2012), p. 37.

136. 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**, 60-63 (2016).

137. C.T.R. Wilson, “*The acceleration of β -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds*”, Proc. Cambridge Philos. Soc. **22**, 534–538(1924).

138. A.S. Eddington, “*The source of stellar energy*”, Nature (Suppl.). **2948**, 25–32 (1926).

139. R.G. Giovanelli, “*Electron energies resulting from an electric field in a highly ionized gas*”, Philos. Mag. **40**, 206–214 (1949).

140. H. Dreiser, “*Electron and ion runaway in a fully ionized gas. I*” // Phys. Rev. **115**, 238–249 (1959). “*Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas: II*”, Phys. Rev. **117**, 329–342 (1960).

141. Б.А. Трубников, “*Столкновения частиц в полностью ионизованной плазме. Вопросы теории плазмы.*” (Госатомиздат, М., 1963. - Вып. 1), с. 98–182.
142. Д.В Сивухин, “*Кулоновские столкновения в полностью ионизованной плазме. Вопросы теории плазмы*”, (Госатомиздат, М., 1964. - Вып. 4), с. 81–187.
143. В.С. Марченко, С.И. Яковленко, “*О влиянии немаксвелловости распределения электронов на кратность ионизации и точность диагностики примесей в плазме с джоулевым нагревом*”, Физика плазмы. **5(3)**, 590–599 (1979).
144. В.Ф. Тарасенко, С.И. Яковленко, “*Убегающие электроны и генерация мощных субнаносекундных пучков электронов в плотных газах*”, Российская академия наук. Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. **63**, 7-63 (2007).
145. J. P. Freidberg, “*Plasma Physics and Fusion Energy*”, (Cambridge University Press. 2007), p. 671.
146. 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).
147. A. Melnikov, L. Eliseev, L. Krupnik et al., in: *29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion*, (ECA, Montreux, Switzerland, 2002), p. 1.115V.
148. 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: *Alushta- International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fussion*. (NSC KIPT, Kharkov, 2014), p.192.
149. 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**, 38-41 (2018).

150. 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**, 266-268 (2014).

151. 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).

152. V.B. Korovin, I.K. Tarasov, E.D. Kramskoy, N.B. Dreval, D.A. Sitnikov, M.M. Kozulya, A.B. Lozin, in: *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, (NSC KIPT, Kharkov, 2016), p.33.

153. 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.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК 1

Список публікацій здобувача 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 i 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. Berezhnyj, 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. Щebetун, 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. Войцєня, 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-School on 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. Lymar, 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. Моїсеєнко, О.М. Швеєц, 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*).

Додаток 2**ДОВІДКА**

про впровадження дисертаційної роботи Коровіна Валерія Борисовича

**«Застосування вісокочастотних джерел електромагнітних полів у
стелараторах Ураган»**

на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

В ІФП ННЦ ХФТІ при проведенні наукових досліджень на установках Ураган впроваджені і використовуються наступні розробки та пропозиції на основі матеріалів дисертаційної роботи Коровіна Валерія Борисовича **«Застосування вісокочастотних джерел електромагнітних полів у стелараторах Ураган»:**

1. Для створення і нагріву плазми ВЧ полями при проведенні більшості наукових експериментів на стелараторах Ураган використовуються вдосканалені ВЧ джерела електромагнітних полів Каскад-1 і Каскад-2.
2. На стелараторі Ураган-3М використовується режим заздалегідь створенної плазми за допомогою ВЧ джерела Каскад-0, що сприяло підвищенню повторюваності результатів.
3. За результатами проведеної в дисертації Коровіна В.Б. оцінки динаміки очищення вакуумної камери була прийнята пропозиція про скорочення часу прогрівання вакуумної камери зі 100 годин до 40 годин, а потім, одночасно з прогріванням, проводити очищення камери безперервним УКХ розрядом, за допомогою вдосканаленого дисертантом джерела УКХ поля. Таким чином, загальний час, необхідний для попереднього очищення вакуумної камери стеларатора Ураган -2М, було зменшено практично вдвічі.

4. Метод очищення вакуумної камери безперервним УКХ розрядом, експериментально випробуваний на стелараторі Ураган-2М, використовується при відпрацюванні нових режимів очищення і при проведенні підготовки установки для проведення експериментів.
5. При настроюванні ВЧ джерел Каскад на робочий режим, крім параметрів плазменного розряду, проводиться контроль спектра ВЧ тока у антені. Застосовується пристрій для придушення вищих гармонік у лінії передачі ВЧ потужності в антену. Це дозволяє запобігти режимів роботи генератора з підвищеним вкладом в розряд потужності вищих гармонік основної частоти генератора.
6. Для придушення потоків електронів-утікачів, що викликають жорстке рентгенівське випромінювання, застосовується розроблений у дисертації метод придушення електронів-утікачів постійним потенціалом.

Заступник генерального Директора ННЦ ХФТІ
член.-кор. НАН України, д.ф.-м. н., професор



Г. О. АРКУША