



ЗАГОРОДНІЙ
Анатолій Глібович — академік НАН України, віцепрезидент НАН України, голова наукової ради цільової програми наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій»

ПРО ВИКОНАННЯ ЦІЛЬОВОЇ ПРОГРАМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ «ПЕРСПЕКТИВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ФІЗИКИ ПЛАЗМИ, КЕРОВАНОВОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ ТА ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ» НА 2017–2019 рр.

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 18 грудня 2019 року

У доповіді висвітлено результати фундаментальних досліджень, проведених ученими НАН України в галузі проблем теорії плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмової електроніки в рамках виконання цільової програми наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» на 2017–2019 рр. Запропоновано започаткувати нову цільову програму наукових досліджень НАН України «Фізика плазми і плазмова електроніка: фундаментальні дослідження та застосування» на 2020–2022 рр.

Вельмишановний Борисе Євгеновичу!
Вельмишановні колеги!

У 2014 р. з ініціативи наукової ради з фізики плазми і плазмової електроніки НАН України було започатковано цільову комплексну програму «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій», розраховану на 2014–2016 рр., спрямовану на розвиток в Академії досліджень з фізики плазми та плазмових технологій. Концепцію та склад наукової ради цієї Програми затверджено постановою Президії НАН України № 115 від 18.09.2013 «Сучасні досягнення в галузі керованого термоядерного синтезу і фізики плазми та пріоритетні напрями міжнародного співробітництва». Потім дослідження з цього напрямку було продовжено за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій»

на 2017–2019 рр., затвердженою постановою Президії НАН України № 29 від 08.02.2017, звіт про виконання якої і пропонується вашій увазі.

Головна мета Програми полягала у розвитку та підвищенні ефективності фундаментальних досліджень з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмової електроніки, спрямованих на виявлення нових фізичних принципів побудови складних плазмових систем та створення на цій основі фізичних засад нових плазмових технологій, а також у розвитку і поглибленні міжнародної співпраці в цій сфері.

Було визначено такі наукові напрями Програми:

- фундаментальні проблеми теорії плазми;
- керований термоядерний синтез;
- плазмова електроніка та колективні методи прискорення заряджених частинок;
- низькотемпературна плазма і технології на її основі;
- плазмодинаміка;
- космічна плазма.

У рамках Програми було виконано 12 проєктів, у яких брали участь установи, що належать до чотирьох відділень НАН України: Відділення ядерної фізики та енергетики; Відділення фізики і астрономії; Відділення фізико-технічних проблем енергетики; Відділення інформатики. Загалом у цій Програмі було задіяно 9 установ: Інститут ядерних досліджень, Інститут фізики плазми ННЦ ХФТІ, Інститут плазмової електроніки і нових методів прискорення ННЦ ХФТІ, Інститут газу, Інститут фізики, Радіоастрономічний інститут, Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України, Інститут прикладної фізики, Інститут електронної фізики.

Загальне фінансування проєктів Програми протягом 2017–2019 рр. становило 3 487 тис. грн, з яких 2 550 тис. грн було виділено за бюджетною програмою 6541030 і 937 тис. грн — за бюджетною програмою 6541230.

Усі завдання Програми було виконано в основному успішно. Зокрема, завдяки реалі-

зації проєктів Програми набули подальшого розвитку дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій, забезпечено кооперацію науковців НАН України щодо спільного використання наукового обладнання, в тому числі діагностичних засобів, та оригінальних програмних продуктів; істотно розширилася участь науковців Академії в міжнародних програмах та проєктах; дещо поліпшено умови для участі дослідників, особливо молодих, у міжнародних конференціях, школах, семінарах за кордоном та докладено зусиль для організації таких заходів в Україні.

За період виконання Програми отримано низку важливих результатів.

Зокрема, в Інституті ядерних досліджень НАН України було показано, що частина термоядерної енергії може переноситися до центру плазми швидкими магнітозвуковими власними коливаннями, збудженими продуктами термоядерної реакції. Це явище, назване доцентровим просторовим каналюванням, поліпшує утримання плазми і може забезпечити режим реактора з іонною температурою, що перевищує електронну (рис. 1). Розвине-



Рис. 1. Просторове каналювання енергії α -частинок при збудженні ними швидких магнітозвукових хвиль з частотами, близькими до гармонік іонної циклотронної частоти; r — радіальна координата; a — радіус плазми

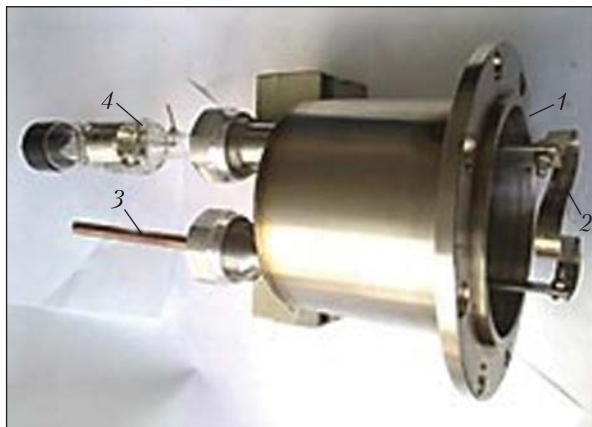


Рис. 2. Термодесорбційний зонд — пристрій для оперативної оцінки ступеня чистоти стінок у високовакуумних камерах стелараторів



Рис. 3. Директор EUROfusion Тоні Донне (Tony Donné) вітає учасників спільного експерименту з дослідження початкової стадії високочастотного розряду, виконаного на установці «Ураган-3М»

ну теорію було застосовано для інтерпретації експериментів з дейтерій-третієвою плазмою на найбільшому на сьогодні токамаку JET, розташованому у Великій Британії. Роботу було виконано в кооперації з колегами зі Швейцарського плазмового центру (Swiss Plasma Center) у рамках проекту консорціуму EUROfusion, а отримані результати опубліковано*. До речі, нагадаю, що EUROfusion — це

* Kolesnichenko Ya.I., Lutsenko V.V., Tyshchenko M.H., Weisen H., Yakovenko Yu.V. and JET Contributors.

консорціум, що координує плазмові дослідження, які проводяться під егідою Європейської спільноти з атомної енергії — Євратому.

В Інституті фізики плазми ННЦ ХФТІ за допомогою встановленої на стелараторі «Ураган-2М» нової дипольної антени, подібної до антени стеларатора Wendelstein 7-X (а це, зауважу, найновітніший у світі стеларатор, побудований у Німеччині), досліджено і запропоновано сценарії ВЧ-створення та нагрівання плазми для стеларатора Wendelstein 7-X. На установці «Ураган-2М» поставлено експеримент зі створення плазми в режимі з неповною іонізацією, який потім було проведено на Wendelstein 7-X. Режим з послідовністю ультракоротких імпульсів електронно-циклотронного нагріву забезпечує неповну іонізацію нейтрального газу і є цілком придатним для очищення внутрішніх вакуумних поверхонь стелараторних установок. Розроблено також термодесорбційний зонд (рис. 2) — новий пристрій для оперативної оцінки ступеня чистоти стінок у високовакуумних камерах, встановлених на установках термоядерного синтезу з магнітним утриманням. Таку діагностику вже впроваджено на харківському стелараторі У-2М, а тепер планується впровадити на установках консорціуму EUROfusion.

Проведено спільний експеримент з Лаборацією фізики плазми Королівської школи (Брюссель, Бельгія) з дослідження початкової стадії високочастотного розряду в установці Ураган-3М (співкерівники — Т. Уотерс і В. Моїсеєнко). Отримані результати планується використати для оптимізації ВЧ-розряду на термоядерних установках Європи і в міжнародному реакторі ITER, який зараз будують у Франції. Ці роботи також проводилися в рамках проектів консорціуму EUROfusion (рис. 3).

Розроблено і застосовано двовимірний код для розрахунків ВЧ-полів у плазмі з урахуванням реальної геометрії камери токамаків. Цей

Analysis of possible improvement of the plasma performance in JET due to the inward spatial channelling of fast-ion energy. *Nucl. Fusion*. 2018. **58** (7): 076012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aac09f>

код використано для розрахунків нелокальних струмів захоплення (рис. 4). Результати цієї роботи є важливими для вибору операційних режимів демонстраційного термоядерного реактора DEMO. Дослідження виконувалися в Інституті фізики плазми ННЦ ХФТІ у співпраці з Технічним університетом м. Грац (Австрія).

В Інституті плазмової електроніки і нових методів прискорення ННЦ ХФТІ розроблено теорію збудження кільватерних полів у багатозонних діелектричних структурах, яка дозволяє досягти значного коефіцієнта трансформації енергії драйверного згустка у прискорюваний згусток. Проведено експерименти зі збудження профільованою послідовністю релятивістських електронних згустків кільватерних полів у прямокутній 3-зонній одноканальній плазмово-діелектричній структурі зі збільшеним коефіцієнтом трансформації. Роботи виконано у співпраці з Аргонською національною лабораторією (США) у рамках програми Департаменту енергетики США.

Показано ефективність використання мікрохвильового випромінювання з випадковою стрибковою фазою для створення високоефективних розрядів низького тиску та додаткового нагрівання плазми в термоядерних пристроях. Стрибки фази хвилі не тільки значно збільшують інтенсивність резонансного нагрівання частинок, а й залучають у цей процес нерезонансні частинки з широким діапазоном початкових швидкостей.

В Інституті фізики НАН України досліджено основні фізичні механізми, що проявляються під час течії щільної плазми з ерозійного джерела і призводять до руйнування мікрровключень у забрудненій плазмі. Вивчено особливості течії щільної низькотемпературної запоорошеної плазми в плазмодинамічній системі з нееквіпотенціальними електродами. Цей підхід, запропонований уперше у світі, вирізняється ефективним введенням додаткової енергії від самоузгоджено створеного потоку швидких електронів. Показано можливість очищення потоку щільної мідної плазми від мікрокрапель (рис. 5).

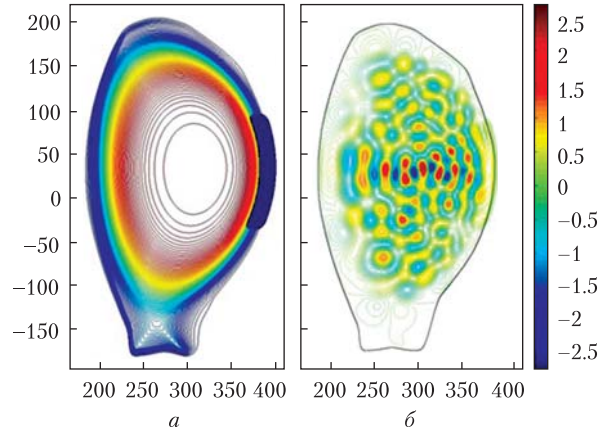


Рис. 4. Розподіл густини плазми в токамаку JET (а) і розподіл ВЧ-полів при нагріванні плазми (б)

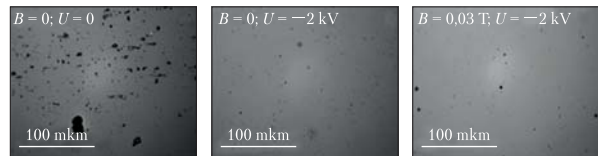


Рис. 5. Очищення потоку щільної мідної плазми від мікрокрапель

В Інституті газу НАН України створено експериментальний зразок високовольтного обладнання для формування підводного імпульсного розряду в установках для електро-розрядного очищення забрудненої води та перевірено ефективність його використання.

Співробітники Інституту космічних досліджень НАН України і ДКА України спільно з колегами з Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України з використанням даних космічних апаратів провели дослідження процесів у сонячній та навколосонячній плазмі. Отримані результати поглиблюють наші знання про космічну плазму та про механізми формування космічної погоди.

В Радіоастрономічному інституті НАН України ідентифіковано відгук навколосонячного плазмового оточення на радіаційні і корпускулярні активації Сонця. За даними довгострокових спостережень природних полів наднизькочастотного діапазону хвиль в

Антарктиді і в Арктиці на обсерваторіях Радіоастрономічного інституту НАН України відтворено фонові — регулярні сезонні і річні варіації параметрів шуманівського резонатора. Підтверджено незалежність планетарної грозової і сонячної активностей. Вивчено динамічні спектри спорадичного декаметрового випромінювання Юпітера з частотною особливістю типу «зебра» (джерело Іо-А, зареєстроване радіотелескопом УТР-2). Для пояснення «зебра»-структури запропоновано модель подвійного плазмового резонансу на гармоніках іонної гірчастоти в сильному магнітному полі Юпітера.

За результатами проведених досліджень виконавці проєктів Програми упродовж 2017–2019 рр. опублікували 158 статей в українських та міжнародних наукових фахових журналах, що входять до міжнародних баз даних, зробили 106 доповідей на національних та міжнародних конференціях.

Наявність в Академії цільової програми наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» відіграла вирішальну роль у прийнятті України до консорціуму EUROfusion та одержанні українськими проєктами фінансової підтримки з боку консорціуму, оскільки таку підтримку, за правилами EUROfusion,

може бути надано лише за умови паритетного фінансування.

Загальний обсяг європейського фінансування українських термоядерних досліджень за період 2017–2019 рр. становив близько 1 млн євро, та ще додатково 150 тис. євро було виділено на створення Національного контактного пункту Євратом–Україна в ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут». Отже, рівень фінансування цих проєктів з боку Європейського Союзу майже в 10 разів перевищує рівень бюджетного фінансування Програми.

З огляду на те, що цільову програму наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» на 2017–2019 рр. було успішно виконано і вона значною мірою сприяла розвитку досліджень з фізики плазми та розширенню міжнародної співпраці українських науковців, зокрема входженню України до європейського консорціуму EUROfusion, прошу розглянути можливість продовжити практику підтримки таких досліджень, започаткувавши нову цільову програму наукових досліджень «Фізика плазми і плазмова електроніка: фундаментальні дослідження та застосування».

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик