



ГАРКУША

Ігор Євгенійович —
член-кореспондент НАН
України, директор Інституту
фізики плазми Національного
наукового центру «Харківський
фізико-технічний інститут»

ПРО МІЖНАРОДНУ СПІВПРАЦЮ В ГАЛУЗІ КЕРОВАНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ В РАМКАХ ДОСЛІДНИЦЬКИХ ПРОГРАМ ЄВРАТОМ

**Стенограма наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 17 травня 2017 року**

У доповіді розглянуто сучасний стан і перспективи розвитку в Україні фундаментальних досліджень з фізики високотемпературної плазми та її технологічних застосувань, проблем термоядерних реакторів, матеріалознавчих та інженерних аспектів термоядерної енергетики, особливо з огляду на міжнародний характер, комплексність і пріоритетність проблеми керованого термоядерного синтезу у світі. Окрему увагу приділено заходам з якнайширшого залучення наукових установ НАН України до участі в європейській дослідницькій термоядерній програмі ЄВРАТОМ.

Шановні члени Президії!

Шановні колеги!

Сьогодні Європейський Союз у галузі фізики високотемпературної плазми і керованого термоядерного синтезу посідає передові позиції у світі, випереджаючи навіть Сполучені Штати Америки. ЄС є головним донором будівництва першого експериментального термоядерного реактора ITER, який зараз споруджується у м. Кадараш (Франція) в межах одного з найбільш грандіозних міжнародних проєктів, у реалізації якого беруть також участь США, Росія, Японія, Китай, Південна Корея та Індія. Основне завдання міжнародного проєкту ITER — досягнення стаціонарної термоядерної реакції дейтерію і тритію з виділенням енергії на рівні 500 МВт. На сьогодні вже виконано більшу частину будівельних робіт, і введення в експлуатацію цього реактора заплановано на 2025 р. Проєкт ITER відповідає таким жорстким вимогам безпеки, що за будь-яких можливих аварій рівень впливу на навколишнє середовище не потребуватиме евакуації населення.



Сучасний стан будівництва міжнародного експериментального термоядерного реактора ITER (м. Кадараш, Франція). www.iter.org



Канцлер Німеччини Ангела Меркель на церемонії урочистого запуску найбільшого у світі надпровідного оптимізованого стеларатора Wendelstein 7-X (м. Грайфсвальд, Німеччина)

Крім того, найвагомішим результатом, отриманим у ЄС останнім часом, є введення в дію найбільшого у світі надпровідного оптимізованого стеларатора Wendelstein 7-X, який

знаходиться в Інституті фізики плазми Товариства Макса Планка в німецькому місті Грайфсвальд. Уже в перших експериментах, проведених на ньому на початку 2016 р., було отримано водневу плазму з температурою електронів 100 млн, а іонів — 20 млн градусів, що значно перевищує температуру в ядрі Сонця. Реактор на основі стеларатора може бути перспективним для створення прототипу комерційного термоядерного реактора DEMO. До речі, на урочистому запуску стеларатора минулого року була присутня канцлер Німеччини Ангела Меркель, а під час будівництва вона тричі відвідувала Інститут фізики плазми Товариства Макса Планка, що яскраво свідчить про ставлення європейських політиків до розвитку науки.

Значний прогрес останніми роками спостерігається в розробленні термоядерних джерел нейтронів та гібридних систем на основі синтез-ділення, завдяки чому можливе створення нового підходу до забезпечення паливного балансу великомасштабної ядерної енергетики та утилізації відпрацьованого ядерного палива. У разі, коли ядерний реактор підкритичний і керується зовнішнім нейтронним джерелом, істотно підвищується рівень безпеки і є можливість проводити трансмутацію відпрацьованого ядерного палива. У разі термоядерно-ядерної гібридної системи забезпечуються нові можливості в енергетиці завдяки спаленню відпрацьованого ядерного палива.

Протягом останніх років Україна крок за кроком йшла до підписання угоди про асоційовану участь у дослідницьких програмах ЄВРАТОМ, що є складовою частиною Рамкової програми Європейського Союзу з досліджень та інновацій «Горизонт-2020». Великий обсяг підготовчих робіт щодо участі українських науково-дослідних установ у програмах ЄВРАТОМ з термоядерних досліджень було виконано протягом останніх 10 років Координаційним комітетом ЄВРАТОМ—Україна. Цей Комітет було сформовано рішенням Уряду України ще в 2002 р. з представників НАН України. Визначну роль у цьому процесі відіграла також Наукова рада з проблеми «Фізика

плазми і плазмова електроніка». Імплементация ж угоди здійснювалася вже спільними зусиллями Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України. Так, у березні 2016 р. остаточно було узгоджено текст договору про асоційоване членство України в ЄВРАТОМ та відбулася зустріч з директором організації. У вересні 2016 р. пройшло третє засідання Координаційного комітету ЄВРАТОМ—Україна з термоядерного синтезу. І нарешті, 29 вересня 2016 р. відбулася ратифікація Угоди між Урядом України та Європейським співтовариством з атомної енергії про наукову і технологічну співпрацю та асоційовану участь України у Програмі наукових досліджень та навчання ЄВРАТОМ (2014—2018), що уможливило участь українських наукових установ у європейських термоядерних дослідженнях. Починаючи з 1 січня 2017 р. НАН України визначено власником зазначеної програми з боку України, а ННЦ ХФТІ — менеджером програми.

Європейські термоядерні дослідження проводяться виключно в рамках створеного Європейського консорціуму з розвитку термоядерної енергетики — EUROfusion, який керує і фінансує європейську дослідницьку програму ЄВРАТОМ. До складу консорціуму входять 30 дослідницьких лабораторій — координаторів досліджень, що представляють 26 країн Європейського Союзу (а також Швейцарію і Україну, які підписали угоду з EUROfusion). Крім того, у роботі EUROfusion беруть участь понад 100 організацій (third parties), які діють через членів консорціуму. EUROfusion активно співпрацює також з проектами F4E (Fusion for Energy) і ITER. Фінансування за програмою «Горизонт-2020» на 2014—2018 рр. становить 424 млн євро, приблизно така сама сума надходить від держав — членів EUROfusion, тобто загальний бюджет на 5 років становить 850 млн євро. Крім того, окреме фінансування в розмірі 283 млн євро виділяється для експлуатації установки JET (Joint European Torus), що є спільною установкою для дослідників з усієї Європи, і, як я вже говорив, окремо фінансується міжнародний проект ITER.



Засідання координаційного комітету ЄВРАТОМ—Україна зі співпраці в галузі термоядерних досліджень

У 2017 р. за поданням НАН України на базі ННЦ ХФТІ створено Український дослідницький центр (Ukrainian Research Unit), що здійснює координацію робіт у 7 українських нау-



Стеларатор «Ураган-2М» (ННЦ ХФТІ)



Стеларатор-торсатрон «Ураган-3М» (ННЦ ХФТІ)

кових установках: ННЦ ХФТІ, Інституті ядерних досліджень НАН України, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, Національному університеті «Львівська політехніка», Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київському національному університеті імені Тараса Шевченка.

Асоційоване членство в консорціумі EUROfusion надає Україні рівні права з іншими членами консорціуму, зокрема, дає українським ученим змогу:

- брати участь у теоретичних та експериментальних дослідженнях на найкращих установках світу;

- отримувати додаткове фінансування наукових робіт в Україні та фінансування поїздок українських науковців за кордон;

- розширити участь у роботі наукових конференцій та нарад за кордоном, публікуванні наукових статей у платних журналах;

- використовувати доступ до баз даних усіх експериментальних установок EUROfusion;

- отримувати нове та вживане наукове обладнання від країн — учасниць EUROfusion;

- впливати на прийняття рішень EUROfusion (2 голоси в Генасамблеї);

- залучати іноземних студентів та аспірантів для виконання кваліфікаційних робіт (MSc, PhD) в Україні.

Програма термоядерних досліджень EUROfusion виконується за чіткою дорожньою картою і містить як короткострокові, так і стратегічні довгострокові завдання. Вона складається з 8 головних місій і має 33 робочих пакети. Детальна робоча програма затверджується щороку на засіданні Генасамблеї консорціуму. Починаючи з кінця січня 2017 р. EUROfusion оголосив про прийняття запитів на участь в існуючих робочих пакетах термоядерної програми на поточний рік. Українські дослідники подали 12 запитів на проекти в пакеті «Дослідження на середніх токамаках». Відповідне схвалення вже отримали українські пропозиції для пакета «JET1» (Інститут ядерних досліджень) та «Діагностика і керування» (Національний університет «Львівська політехніка»). Українські фахівці також братимуть участь у пакетах «Стеларатор» (ННЦ ХФТІ, Інститут ядерних досліджень) та «Плазмово-поверхнева взаємодія» (ННЦ ХФТІ, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»).

Слід зазначити, що, крім проектів теоретичних досліджень та спільних робіт на європейських термоядерних установках, європейське співтовариство підтримало програми експериментів на українських установках — стелараторі «Ураган-2М» та плазмових прискорювачах КСПП Х-50 і КСПП-М, що відкриває можливості для проведення їх модернізації.

Крім дослідницьких програм у галузі термоядерних досліджень виконується також навчальна програма Fusenet, учасником якої є Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. Упродовж року кілька десятків студентів та аспірантів отримали можливість безкоштовно відвідати школи молодих учених та конференції в країнах ЄС. У рамках цієї програми відкрито також 20 наукових і 20 інженерних аспірантських стипендій у галузі термоядерного синтезу, в конкурсі на здобуття яких можуть брати участь наші молоді науковці.

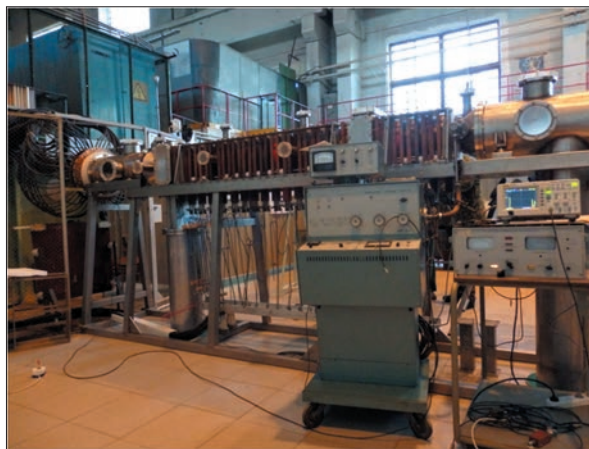
Слід зауважити, що дослідницька та навчальна програми ЄВРАТОМ у галузі керованого термоядерного синтезу побудовані на принципі спільного фінансування. Фінансовий внесок з боку ЄВРАТОМ становить близько 55% від загального обсягу фінансування тематики, тобто збільшення грантової підтримки з боку ЄВРАТОМ потребує від української сторони відповідного збільшення видатків країни на програму досліджень.

Сучасні здобутки в галузі фізики плазми в Україні ґрунтуються на роботах класиків — академіків Л.Д. Ландау, М.М. Боголюбова, О.І. Ахієзера, О.Г. Ситенка, К.Д. Синельникова, Я.Б. Файнберга, членів-кореспондентів К.М. Степанова, В.Т. Толока, В.І. Терешина, І.О. Солошенка, Н.Д. Моргуліса та ін. Установи НАН України мають достатній кадровий потенціал і матеріально-технічну базу (низку термоядерних експериментальних і дослідницьких установок) для вирішення проблем теоретичного та числового моделювання процесів у термоядерних системах, для діагностики плазми, а також матеріалів і технологій термоядерного реактора.

У ННЦ ХФТІ зосереджено основну експериментальну базу термоядерних установок, до досліджень з термоядерної проблематики залучено понад 250 науковців та інженерно-технічних працівників з різних інститутів Національного наукового центру, тоді як потужна теоретична школа з фізики термоядерної плазми сконцентрована переважно в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Інституті ядерних досліджень



Квазістаціонарний плазмовий прискорювач КСПП Х-50 (ННЦ ХФТІ)



Плазмовий прискорювач нового покоління КСПП-М (ННЦ ХФТІ)

НАН України, Інституті фізики плазми ННЦ ХФТІ, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна.

Серед експериментально-дослідницьких установок в Україні слід назвати стеларатор «Ураган-2М» (до 2006 р. був найбільшою установкою цього типу в Європі), стеларатор-торсатрон «Ураган-3М», найпотужніший у світі квазістаціонарний прискорювач плазми КСПП Х-50. Нещодавно введено в дію плазмовий прискорювач нового покоління для дослідження матеріалів ядерної і термоядерної енергетики.

ки в екстремальних умовах КСПП-М. На стелараторі «Ураган-3М» було проведено спільний українсько-бельгійський експеримент разом із брюссельською Лабораторією фізики плазми (керівники — Т. Уотерс і В. Моїсеєнко) з дослідження початкової стадії височастотного розряду. Отримані результати і нові знання будуть використані для оптимізації ВЧ-розряду на термоядерних установках Європи і в міжнародному реакторі ITER. Квазістаціонарний плазмовий прискорювач КСПП Х-50 задіяно для експериментального відтворення умов на першій стінці та диверторі термоядерного реактора, а також у дослідженнях властивостей матеріалів в екстремальних умовах (10^{28} іон/м²·с, Р ~ 200 ГВт/м²). Прискорювач нового покоління КСПП-М призначений для генерування потужних потоків плазми з метою вивчення радіаційно-пучкового впливу на нові перспективні матеріали для ядерної і термоядерної енергетики.

Тематика теоретичних досліджень високотемпературної плазми в Україні стосується переважно вивчення фізичних механізмів генерації і нагрівання плазми, утримання, рівноваги та стійкості плазми в магнітних системах (токамаках, стелараторах, електромагнітних пастках), процесів переносу; розроблення кінетичної теорії транспортних процесів у турбулентній та запыошеній плазмі; дослідження колективних процесів та аномальних явищ, зумовлених високоенергетичними іонами в термоядерній плазмі; вивчення колективної динаміки частинок у випадкових полях, нелінійних та стохастичних механізмів прискорення частинок, нелінійних стаціонарних структур; теоретичного обґрунтування нових концепцій гібридних ядерно-термоядерних реакторів.

Особливо хочу підкреслити, що розвиток фізики плазми в Україні пов'язаний не лише із суто науковими і теоретичними здобутками, а й з корисними для практичного промислового використання результатами. На основі фундаментальних досліджень з цього напрямку отримано цілу низку важливих прикладних розробок, таких як нові методи нанесення функціональних покриттів, модифікація та легування

матеріалів потужними потоками плазми, плазмові джерела інтенсивного екстремального ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, плазмові озонатори, низькотемпературні плазмові озонно-ультразвукові стерилізатори, геліконні технологічні джерела, плазмохімічні реактори, паро-плазмова технологія перероблення органічних відходів, інші перспективні екологічно чисті плазмові технології для промисловості, медицини, сільського господарства та охорони довкілля.

Матеріалознавчі та інженерні аспекти термоядерної енергетики — це комплексна проблема, вирішення якої потребує створення нових матеріалів для термоядерних реакторів, дослідження їхньої поведінки в екстремальних умовах, розроблення нових покриттів і сполук, методів з'єднання та зварювання, нових методів діагностики, новітніх інженерних розробок у сферах сильноточної електроніки, енергетики, турбінобудування. Протягом останніх трьох років у НАН України успішно виконується цільова комплексна програма «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій», хоча її фінансування залишає бажати кращого.

Потенціал співробітництва з Україною у сфері керованого термоядерного синтезу високо оцінюється керівниками консорціуму ЄВРАТОМ. В Україні є очевидні резерви для подальшого посилення інтеграції вітчизняних наукових установ до проектів ЄВРАТОМ. На нинішньому етапі здійснюється налагодження взаємодії в рамках виконання робочих пакетів, де бере участь Український дослідницький центр (Ukrainian Research Unit), а також опрацювання тем та інструментів для такого співробітництва на подальший період дії програми «Горизонт-2020».

Водночас хочу ще раз наголосити, що умови участі в проектах ЄВРАТОМ передбачають наявність національного фінансування відповідних робіт (45 %) та механізмів кооперації держави у міжнародних проектах. Тобто чим більше виділяється коштів на фінансування програм за термоядерною тематикою

в Україні, тим більшим стає фінансування з боку Європейського Союзу. Підвищенню рівня та ефективності спільних робіт під егідою ЄВРАТОМ значно сприяють зазначена вище цільова комплексна програма НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазових технологій», спільні конкурси НАН України і УНТЦ, базове фінансування установ, в яких тематика проектів формується з урахуванням пріоритетів, перспективних для наших європейських партнерів. Це також дає можливість розробити додаткові інструменти кооперації з ЄВРАТОМ. Отже, організація вітчизняних наукових досліджень і створення

технологічних розробок у галузі керованого термоядерного синтезу, фізики плазми і плазових технологій, а також активізація міжнародного співробітництва потребують повноцінного фінансового забезпечення, реалізації скоординованої програми розвитку досліджень високотемпературної плазми як основи енергетики майбутнього. Необхідне розроблення новітніх технологічних застосувань плазми, поліпшення координації досліджень в установах Академії та вищих навчальних закладах України.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання
підготувала О.О. МЕЛЕЖИК*