



ГАРКУША

Ігор Євгенійович — член-кореспондент НАН України, заступник генерального директора Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут»

УЧАСТЬ У ТЕРМОЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЄВРАТОМ: РЕЗУЛЬТАТИ, ДОСЯГНУТІ ЗА ПРОГРАМОЮ «ГОРИЗОНТ-2020», ТА ПЕРСПЕКТИВИ В НАСТУПНІЙ ПРОГРАМІ ЄС НА 2021–2027 рр.

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 17 лютого 2021 року

У доповіді наголошено на важливості розвитку термоядерних досліджень у світі, необхідності подальшої інтеграції українських наукових установ до Європейського дослідницького простору та активізації участі українських науковців у виконанні досліджень світового рівня з фізики плазми і керованого термоядерного синтезу. Обговорено актуальність і комплексність проблеми керованого термоядерного синтезу, яка охоплює не лише різні аспекти фізики високотемпературної плазми як основи енергетики майбутнього, а й теорію побудови термоядерних реакторів, питання матеріалознавства, інженерні аспекти термоядерної енергетики тощо.

Шановний Анатолію Глібовичу!

Шановні члени Президії!

У своїй доповіді я коротко поінформую вас про те, як наші вчені беруть участь у європейській дослідницькій програмі Євратом, яка є комплементарною складовою програми Європейського Союзу з досліджень та інноваційної діяльності «Горизонт-2020», а також окреслю перспективи нашої участі в наступній рамковій програмі ЄС «Горизонт Європа», розрахованій на 2021–2027 рр.

Як відомо, в 2015 р. Україна стала асоційованим членом програми «Горизонт-2020», однак це не привело до її автоматичної участі в програмі Євратом, оскільки участь будь-якої країни в дослідницькій програмі Європейського співтовариства з атомної енергії (Євратом) регулюється окремою урядовою угодою про асоціацію. Угоду між Урядом України та Європейським співтовариством з атомної енергії про наукову і технологічну співпрацю та асоційовану участь України в програмі наукових



Будівельний майданчик ITER з висоти пташиного польоту. Січень 2021 р. (джерело: www.iter.org)



Монтажні роботи зі зведення корпусу реактора ITER (джерело: www.iter.org)

досліджень та навчання Євратом (2014–2018) було підписано 27 червня 2016 р., а ратифіковано — 29 вересня 2016 р., після чого стала можливою участь українських наукових установ в європейських термоядерних дослідженнях. Так, з 1 січня 2017 р. Національну академію наук України було визначено власником програми з боку України, а Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» — менеджером програми. Наприкінці 2018 р. було прийнято рішення про продовження участі в програмі Євратом до 2020 р.

Кількість проектів програми Євратом, у яких беруть участь українські науковці, становить 35. Це друга за кількістю проектів з нашою участю програма в рамках «Горизонт-2020» (більше лише за програмою «Дії Марії Скло-

довської-Кюрі» (The Marie Skłodowska-Curie Actions)). Частка Євратому в загальному фінансуванні є досить значною — 12,5%, внесок ЄС у фінансування проектів, які виконуються за участі українських учених, — близько 4,7 млн євро.

Дослідження в рамках програми Євратом мають три складові: 1) дослідження в галузі ядерної фізики та радіаційного захисту; 2) термоядерні дослідження; 3) діяльність об'єднаного дослідницького центру Європейської комісії JRC (Joint Research Center). У доповіді ми розглянемо лише «термоядерну» частину програми Євратом.

Європейські термоядерні дослідження проводяться в рамках створеного Європейською комісією загальноєвропейського консорціуму з розвитку термоядерної енергетики — EUROfusion, який складається з національних дослідницьких ланок — юнітів. EUROfusion об'єднує 30 наукових організацій-бенефіціарів з країн ЄС та асоційованих країн (Швейцарії, України і Великої Британії), які є координаторами досліджень у своїх державах, а також понад 150 афілійованих з ними національних наукових і освітніх установ-партнерів (Linked Third Parties). У 2017 р. для координації українських досліджень в EUROfusion на базі ННЦ ХФТІ було створено Український дослідницький юніт (Ukrainian Research Unit), до складу якого наразі входять три установи НАН України та три провідні університети: ННЦ ХФТІ, Інститут ядерних досліджень НАН України, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (приєднався в 2018 р.), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Національний університет «Львівська політехніка» та Київський національний університет імені Тараса Шевченка (приєднався в 2019 р.).

Фінансування Єврокомісією програми Євратом як складової програми «Горизонт-2020» у 2014–2018 рр. становило 424 млн євро, приблизно така сама сума надходить ще від держав — членів EUROfusion, тобто загальний п'ятирічний бюджет становить близько 850 млн євро. Крім того, окреме фінансування

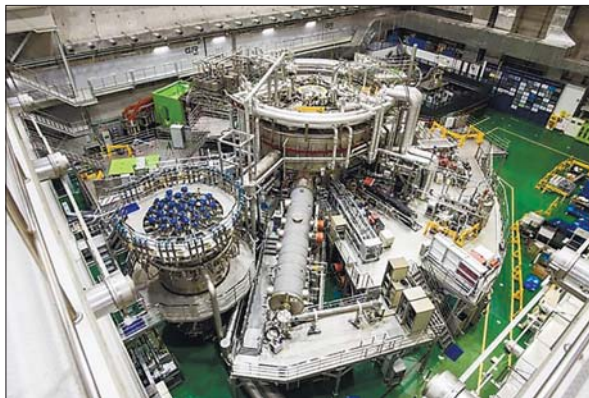
виділяється на міжнародний проєкт ITER, а також на експлуатацію установки JET (Joint European Torus), яка є спільною установкою для дослідників з усієї Європи.

Дещо детальніше зупинюся на ключовому термоядерному проєкті міжнародної спільноти — спорудженні в м. Кадараш (Франція) експериментального термоядерного реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), у реалізації якого крім Європейського Союзу беруть участь Японія, США, Китай, Південна Корея, Індія та Російська Федерація. Близько половини обсягу фінансування припадає на ЄС.

Будівництво ITER просувається згідно із затвердженим планом, станом на початок 2021 р. вже виконано приблизно 73% робіт. Отримання першої плазми заплановано на 2026 р. Проєкт ITER відповідає найвищим вимогам безпеки для таких об'єктів, принаймні за будь-якого типу аварії можливий рівень негативного впливу на навколишнє середовище не потребуватиме евакуації населення. Крім того, значною перевагою термоядерної енергетики є те, що вона позбавлена викидів діоксиду вуглецю.

Основне завдання міжнародного проєкту ITER — досягнення стаціонарної термоядерної реакції дейтерію і тритію з виділенням енергії на рівні 500 МВт і коефіцієнтом 10 (тобто кількість отриманої енергії має на порядок перевищувати витрати). Загалом реалізація цього проєкту стала можливою завдяки активному розвитку досліджень не лише в галузі високотемпературної плазми, а й фізики твердого тіла, надпровідності, сучасного матеріалознавства та в багатьох інших напрямках науки і техніки.

Кажучи про ITER, не можна не згадати нещодавнє досягнення південнокорейських науковців, які в грудні 2020 р. встановили новий рекорд з утримання плазми: їм вдалося утримати стабільність плазми впродовж 20 с за температури близько 100 мільйонів градусів. Експеримент проводили на установці KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research), це дослідницький токамак у Націо-



Дослідницький токамак KSTAR у Південній Кореї (джерело: www.kfe.re.kr)



Найбільший у світі надпровідний стеларатор Wendelstein 7-X (Німеччина) (джерело: www.ipp.mpg.de/w7x)

нальному інституті термоядерних досліджень у Теджоні, обладнаний, як і ITER, тільки надпровідними магнітами.

Однак токамак не єдиний тип реактора, який розглядають як основу майбутньої термоядерної енергетики. Серйозну конкуренцію йому становить надпровідний стеларатор. Так, на найбільшому у світі стелараторі Wendelstein 7-X, спорудженому в Німеччині в Інституті фізики плазми Товариства Макса Планка (м. Грайфсвальд), уже в перших експериментах було отримано плазму з температурою електронів 100 млн, а іонів — 20 млн градусів. Наступного, 2022 р. після встановлення на Wendelstein 7-X дивертора планується, що



Український стеларатор «Ураган-2М» в ННЦ ХФТІ



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

дослідники зможуть утримати плазму вже протягом пів години.

Членство України в консорціумі EUROfusion відкрило можливості для успішного інтегрування наших науковців у загальноєвропейський науковий простір, участі в теоретичних та експериментальних дослідженнях на найкращих установках світу (токамаки JET, TCV, MAST, ASDEX UG, стеларатори W7-X та LHD). Виконання програми термоядерних досліджень EUROfusion відбувається за чіткою дорожньою картою, а детальні робочі програми щороку затверджуються на засіданні генеральної асамблеї консорціуму. Загальна програма містить як короткострокові, так і довгострокові стратегічні завдання і складається з 33 робочих пакетів. Українські

науковці беруть участь у 8 робочих пакетах, таких як:

- 1) JET1 (Інститут ядерних досліджень, ННЦ ХФТІ);
- 2) «Діагностика і керування» (Національний університет «Львівська політехніка»);
- 3) «Стеларатор» (ННЦ ХФТІ, Інститут ядерних досліджень);
- 4) «Середні токамаки» (ННЦ ХФТІ, Інститут ядерних досліджень);
- 5) «Плазмово-поверхнева взаємодія» (ННЦ ХФТІ, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна);
- 6) «Додаткові дослідження ІС» (ННЦ ХФТІ, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна);
- 7) «Рідкометалевий дивертор» (ННЦ ХФТІ);
- 8) «Освіта» (Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННЦ ХФТІ, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова).

Дуже важливо, що підтримку з боку Європейського співтовариства з атомної енергії здобули експерименти на українських термоядерних установках. Токамаків в Україні немає, але в ННЦ ХФТІ є стеларатори «Ураган-2М» і «Ураган-3М», а також плазмові прискорювачі КСПП Х-50 і КСПП-М, які було внесено до переліку експериментальних установок ЄС для виконання термоядерної програми досліджень «Євратом» на 2021–2027 рр. До речі, ці установки входять до реєстру наукових об'єктів, що становлять національне надбання. На плазмових прискорювачах можна відтворювати екстремальні енергетичні корпускулярні навантаження на елементи внутрішньої стінки та дивертора реактора. На стелараторі «Ураган-3М» було проведено українсько-бельгійський експеримент разом з брюссельською Лабораторією фізики плазми з дослідження початкової фази розряду в стелараторі, методів очищення вакуумних поверхонь у термоядерних установках та імітаційні дослідження матеріалів дивертора в умовах екстремальних корпускулярних та енергетичних навантажень реактора.

Дуже коротко розповім про найвагоміші результати, отримані українськими вченими в рамках програми EUROfusion. Так, на об'єднаному європейському токамаку JET фахівці Інституту ядерних досліджень НАН України протягом 2017–2020 рр. успішно виконали дослідження з генерування та спостереження швидких іонів дейтерію та α -частинок, породжених термоядерним синтезом, а дослідники з ННЦ ХФТІ взяли участь в аналізі та обробленні результатів експериментів і подальшому відпрацюванні діагностики плазми на основі автокореляційної рефлектометрії, а також у дослідженнях методів пригнічення електронів-утікачів. Українські науковці взяли участь в унікальних експериментах з трийонного ICRH (іонного циклотронного нагрівання плазми), в яких одночасно нагріваються як дейтерій, так і ^3He , і дослідили таку схему нагрівання на токамаку JET. Було показано, що α -частинки і швидкі дейтрони утворюються у вузькій зоні навколо плазмового центру. Ця схема ВЧ-нагрівання в токамаках та стелараторах підвищує ефективність нагрівання і поліпшує характеристики плазми.

Співробітники Інституту ядерних досліджень НАН України відкрили ефект просторового каналування енергії α -частинок при збудженні ними швидких магнітозвукових хвиль з частотами, близькими до гармонік іонної циклотронної частоти, і показали, що частина термоядерної енергії може переноситися до центру плазми за допомогою швидких магнітозвукових власних коливань, збуджених продуктами термоядерної реакції. Це явище поліпшує утримання енергії плазми та може забезпечити режим реактора з іонною температурою, що перевищує електронну. Розвинену теорію застосовано для інтерпретації експериментів з дейтерій-третієвою плазмою на токамаку JET, де спостерігався режим із зазначеними властивостями плазми.

Ще один результат Інституту ядерних досліджень НАН України також стосується іонного циклотронного нагрівання, але зі зміщеною сепаратрисою (ICRH-SS). Подальший розвиток цієї схеми та числове моделювання розряду в



Квазістаціонарний плазмовий прискорювач КСПП Х-50 (ННЦ ХФТІ)



Плазмовий прискорювач нового покоління КСПП-М (ННЦ ХФТІ)

токамаку JET продемонстрували практичну здійсненність ICRH-SS.

На іспанському стелараторі TJ-II було впробувано розроблену українськими вченими подвійну систему діагностики високо-температурної плазми пучком важких іонів. Було вивчено часову і просторову еволюцію радіальних профілів густини і потенціалу та довгомасштабні кореляції (LRC) параметрів плазми. Фактично вперше продемонстровано можливість вимірювання на термоядерних установках 2D-томограми розподілу потенціалу плазми та електричних полів без збурення плазмового середовища. Унікальні можливості такої подвійної системи дають змогу розшири-



Розроблена за участі українських фахівців система безконтактної діагностики плазми пучками важких іонів на стелараторі TJ-II (CIEMAT, Іспанія)

ти дослідження великомасштабних механізмів переносу від периферії до центра плазми.

Дуже важливі для розвитку термоядерної енергетики експерименти з вивчення властивостей плазмових захисних шарів та їх впливу на ерозійні характеристики матеріалів і компонентів термоядерного реактора було проведено для вольфрамових і альтернативних їм капілярно-пористих систем на основі літію. Ці експерименти відтворюють умови великих корпускулярно-енергетичних навантажень, характерних для умов роботи дивертора термоядерного реактора DEMO. Показано, що поблизу опромінюваних капілярно-пористих поверхонь виникають перехідні плазмові шари з густиною, на порядок більшою, ніж у потоці, що налітає. З'ясовано, що за таких екстремальних навантажень спостерігається позитивний захисний ефект парового шару, який здатен поглинати близько 99% енергії, що надходить з плазми.

На основі результатів фундаментальних досліджень з фізики плазми останніми роками отримано також низку важливих при-

кладних розробок. Було запропоновано нові методи нанесення функціональних покриттів, модифікації матеріалів потужними потоками плазми, розроблено плазмові джерела інтенсивного екстремального ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, плазмові озонатори, низькотемпературні плазмові озонно-ультразвукові стерилізатори, створено перспективні екологічно чисті плазмові технології для промисловості, медицини, сільського господарства, охорони довкілля.

Участь у консорціумі EUROfusion є унікальним прикладом залучення коштів Європейського Союзу для розвитку вищої освіти в Україні в галузі фізики плазми та керованого термоядерного синтезу в межах програми Євратом, зокрема робочого пакету «Освіта». За освітньою програмою Європейська комісія відшкодовує частину видатків на підготовку аспірантів і магістрів у країнах-учасницях консорціуму. Так, було започатковано 20 наукових та 20 інженерних аспірантських стипендій у галузі термоядерного синтезу. В межах навчальної програми FuseNet щороку кілька десятків українських студентів та аспірантів мають можливість безкоштовно відвідати школи для молодих учених, тренінги та конференції в країнах ЄС. У період пандемії науково-освітня діяльність не перервалася і продовжується в дистанційному форматі. Наприклад, студенти Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна в рамках навчального курсу з утримання плазми здійснювали дистанційне керування в режимі реального часу роботою токамака GOLEM у Чеському технічному університеті в Празі. Українські аспіранти академічних установ та університетів на регулярній основі беруть участь у загальноєвропейських освітніх заходах. Зокрема, нещодавно на щорічній конференції FuseNet PhD Event близько 20 з них доповідали про свої наукові здобутки і мали можливість поспілкуватися з колегами з інших країн.

Отже, участь у EUROfusion дає Україні цілу низку переваг. Насамперед вона сприяє інтегруванню українських науковців у загальноєвропейський науковий простір, дає їм мож-

ливість брати участь у теоретичних та експериментальних дослідженнях на найкращих термоядерних установках, бути залученими до амбітного європейського проєкту DEMO зі створення термоядерної електростанції. По-друге, це додаткове фінансування з боку Єврокомісії наукових досліджень в Україні — за 2017–2020 рр. ми отримали понад 1,2 млн євро. По-третє, це можливість для українських учених здійснювати робочі поїздки за кордон для проведення спільних досліджень (понад 70 відряджень за цією програмою). Крім того, участь у консорціумі відкриває доступ до баз даних усіх експериментальних установок Євросоюзу та всіх публікацій результатів у рамках програми (EUROfusion Pinboard), дає можливість публікуватися в платних журналах (внесок автоматично сплачується Євратомом), розширює участь наших учених у робочих нарадах, наукових конференціях, дозволяє отримувати нове та вживане наукове обладнання від країн-учасниць, а також впливати на прийняття рішень консорціумом EUROfusion, оскільки Україна має 2 голоси в його генасамблеї. Зрештою, участь у EUROfusion поліпшує підготовку фахівців у термоядерній галузі і дозволяє, хоча б частково, вирішити одну з найбільш проблем української науки — вплив талановитої наукової молоді.

Зараз термін дії рамкової програми «Горизонт-2020» завершився, і Європейський Союз розпочинає нову програму «Горизонт Європа», приєднання до якої потребує укладання нової угоди. Однак, незважаючи на затримку із затвердженням офіційних документів, конкурси на виконання проєктів 9-ї рамкової програми ЄС уже тривають. Україна також подавала свої пропозиції. Наразі 4 проєкти вже схвалено:

1) «Перспективні дослідження проблем взаємодії плазми з поверхнями за великих теплових навантажень; розроблення сценаріїв ВЧ-очищення поверхонь» (ННЦ ХФТІ);

2) «Участь у робочому пакеті W7X» (план роботи консорціуму на 2021–2025 рр.) (ННЦ ХФТІ);

3) «Розроблення та тестування опроміненням прототипу датчиків Холла для плазмової

магнітної діагностики DEMO» (Національний університет «Львівська політехніка»);

4) «Додаткові дослідницькі проєкти в напрямі інерційного синтезу» (ННЦ ХФТІ, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна).

Додатково схвалено 5 українських персональних заявок на участь у 7 експериментальних кампаніях на установках JET, AUG, MAST, TCV, WEST. Також без конкурсу схвалено проєкти в рамках фіксованих бюджетів за напрямом «Освіта». Ще 5 проєктів зараз проходять процедуру конкурсного відбору:

1) «Додаткові дослідження з теорії та моделювання» (Інститут ядерних досліджень);

2) «Екстремальні теплові та корпускулярні навантаження КСПП на лімітер та дивертор» (ННЦ ХФТІ);

3) «Участь у робочому пакеті DES» (ННЦ ХФТІ);

4) «Матеріали для компонентів, що контактують з плазмою DEMO; моделювання видалення гелієвої золи для електростанції» (ННЦ ХФТІ);

5) «ННФ-тестування перспективних удосконалених матеріалів для DEMO» (ННЦ ХФТІ).

Отже, установи НАН України мають здобутки, кадровий потенціал і матеріально-технічну базу для подальшої успішної участі в консорціумі EUROfusion з метою вирішення проблем теоретичного та числового моделювання процесів у термоядерних системах, діагностики плазми, а також матеріалів та технологій для термоядерного реактора. В НАН України працює Наукова рада з фізики плазми та плазмової електроніки, до складу якої входять представники академічних інститутів, а також провідних організацій МОН України. На базі ННЦ ХФТІ ефективно діє Національний контактний пункт «Євратом–Україна», успішно виконано інфраструктурний проєкт Єврокомісії UaInEUatom, метою якого є сприяння поглибленню інтеграції українських учених та молодих науковців до європейської спільноти, зокрема залучення їх до участі у програмі Євратом, надання консультативної

допомоги та організація відповідних тренінгів. Тільки протягом 2019–2020 рр. було проведено 8 тренінгів для українських науковців щодо підготовки пропозицій, управління проектами в програмі «Горизонт-2020», фінансових правил, декларування витрат тощо. За фінансової підтримки ЄС було створено і зараз активно використовується сучасний телекомунікаційний центр Євратом–Україна.

Окремо слід підкреслити, що дослідницька та навчальна програма Євратом у галузі керованого термоядерного синтезу ґрунтується на принципі co-fund, тобто спільного фінансування. Фінансовий внесок з боку Євратому становить близько 55% від загального обсягу фінансування цієї тематики, решту покриває фінансування в рамках національних програм кожної країни-учасниці. Отже, збільшення грантової підтримки з боку Євратому можливе лише за умови відповідного збільшення національного фінансування термоядерних досліджень.

В Україні підвищенню ефективності спільних робіт під егідою Євратому сприяють цільова програма наукових досліджень НАН України «Фізика плазми і плазмова електроніка: фундаментальні дослідження та застосування» і бюджетна програма «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230), тематика проєк-

тів у яких формується з урахуванням європейської співпраці. Це надає додаткові інструменти для успішної кооперації з Євратомом.

Разом з тим організація вітчизняних наукових досліджень і створення технологічних розробок у галузі керованого термоядерного синтезу, фізики плазми і плазмових технологій, а також активізація міжнародного співробітництва потребують повноцінного фінансового забезпечення, реалізації скоординованої програми розвитку досліджень високотемпературної плазми як основи енергетики майбутнього.

Певним гальмівним фактором на сьогодні є також затримка з підписанням нових угод про асоційоване членство України в рамковій програмі ЄС «Горизонт Європа» та в програмі Євратом. Поточний, 2021 рік розпочався з підписання Меморандуму про порозуміння, на основі якого ми співпрацюємо вже в новій програмі в очікуванні, що в липні цього року Уряд України підпише угоду про членство в програмі «Горизонт Європа», а у жовтні — про участь у консорціумі EUROfusion. Проте вже нині спостерігається певне відхилення від плану дій з боку української влади, що не може не викликати занепокоєння.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Igor E. Garkusha

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6538-6862>

National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”
of the National Academy of Sciences of Ukraine

PARTICIPATION IN THERMONUCLEAR RESEARCH OF EURATOM:
RESULTS ACHIEVED UNDER THE HORIZON 2020 PROGRAM
AND THE PROSPECTS FOR THE NEXT EU PROGRAM FOR 2021-2027

Transcript of the report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, February 17, 2021

The report emphasizes the importance of developing thermonuclear research in the world, the need for further integration of Ukrainian research institutions into the European research area and increasing the participation of Ukrainian scientists in world-class research in plasma physics and controlled thermonuclear fusion. The urgency and complexity of the problem of controlled thermonuclear fusion, which covers not only various aspects of high-temperature plasma physics as the basis of energy of the future, but also problems of thermonuclear reactors, materials science, engineering aspects of thermonuclear energy, etc. are discussed.

Keywords: thermonuclear research in Ukraine, controlled thermonuclear fusion, EURATOM, EUROfusion.