



**ТОВМАЧЕНКО**  
**Василь Миколайович,**  
кандидат хімічних наук,  
старший науковий співробітник,  
науковий співробітник,  
Національна наукова  
сільськогосподарська  
бібліотека НААН  
[vtovmachenko@ukr.net](mailto:vtovmachenko@ukr.net)  
(м. Київ, Україна)

## **ФІЗИКА ПЛАЗМИ І КЕРОВАНІЙ ТЕРМОЯДЕРНИЙ СИНТЕЗ: ІСТОРИЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ (1950–2017)**

*На основі історичного і проблемно-хронологічного аналізу досліджено надскладну наукову і технічну проблему фізики плазми і керованого термоядерного синтезу (КТС) – створення економічно ефективних термоядерних реакторів, які в перспективі можуть стати основою енергетики нового покоління. Дослідження з фізики плазми започатковано в 50-х рр. минулого століття, зокрема, вперше в Україні, в Харківському фізико-технічному інституті (ХФТІ). Харківські фізики є беззаперечними лідерами досліджень і розробок в галузі фізики плазми і керованого термоядерного синтезу і залишаються ними і понині. В інституті була розроблена і споруджена серія великих установок – стелараторів типу «Ураган» для магнітного утримання високотемпературної плазми. Успіхи ХФТІ стимулювали успішний розвиток досліджень стелараторів у Німеччині та Японії. Інтенсивна робота з дослідження фізики плазми і проблеми КТС дала результати в супутніх напрямках. Так, широке впровадження в промисловості, у т. ч. за кордоном, набула розроблена у ХФТІ іонно-плазмова технологія нанесення покриттів на установках «Булат», яка значно підвищує зносостійкість різального інструменту і деталей машин. Проблема КТС постійно знаходиться в полі зору Національної академії наук і Уряду України. Наведено матеріали розгляду проблеми КТС як основи енергетики майбутнього, та її технологічних застосувань. На основі гібридної схеми «синтез–ділення» можна запропонувати новий підхід до забезпечення паливного балансу масштабної ядерної енергетики й утилізації відпрацьованого ядерного палива. Приділено увагу заходам з наукових установ НАН України до*

участі в європейській дослідницькій термоядерній програмі ЄВРАТОМ. ЄС є головним донором будівництва першого експериментального термоядерного реактора ITER, який зараз споруджується у м. Кадараши (Франція) в межах одного з найбільш грандіозних міжнародних проєктів, у реалізації якого беруть також участь США, Росія, Японія, Китай, Південна Корея та Індія. Складнощі створення комерційного термоядерного реактора спонукали пошук альтернативних шляхів використання енергії синтезу легких ядер, так званий «холодний ядерний синтез», або LENR (low energy nuclear reactions).

**Ключові слова:** фізика плазми, керований термоядерний синтез, термоядерні реактори, ЄВРАТОМ, ITER, токамак, стеларатор, «Булат», «холодний ядерний синтез».

## **PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED THERMONUCLEAR SYNTHESIS: HISTORICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT (1950–2017)**

*On the basis of historical and problem-chronological analysis, the most complicated scientific and technical problem of plasma physics and controlled thermonuclear fusion (TCF) is investigated – the creation of cost-effective thermonuclear reactors, which in the future can become the basis of a new generation of energy. Research in plasma physics was founded in the 50s, in the last century, in particular, for the first time in Ukraine, at the Kharkov Institute of Physics and Technology (KIPT). Kharkov physicists are the undisputed leaders in research and development in the field of plasma physics and controlled thermonuclear fusion and remain to this day. At the Institute a series of large-scale installations – «Hurricane» type stellarators for magnetic confinement of high-temperature plasma – was developed and built. The success of KIPT has stimulated the development of research on stellarators in Germany and Japan. Intensive work on the study of plasma physics and the problems of TCF yielded results in related directions. So, widespread adoption in industry, including abroad, she received the ion-plasma coating technology developed at KIPT at Bulat plants, which significantly increases the wear resistance of tools and machine parts. The problem of TCF is constantly in the field of view of the National Academy of Sciences and the Government of Ukraine. The materials of the consideration of the TCF problem as the basis of the energy of the future, and its technological applications, are presented. Based on the hybrid synthesis-fission scheme, a new approach can be proposed to ensure the fuel balance of large-scale nuclear energy and the disposal of spent nuclear fuel. Attention is paid to measures from scientific institutions of the NAS of Ukraine to participate in the EURATOM European Thermonuclear Research Program. The EU is the main donor for the construction of the first experimental nuclear fusion reactor, ITER, which is currently under construction in the city of Cadarache (France) as part of one of the most ambitious international projects, in which the USA, Russia, Japan, China, South Korea and India also take part. The difficulties of creating a commercial thermonuclear reactor prompted the search for*

*alternative ways to use the energy of fusion of light nuclei, the so-called «cold nuclear fusion», or LENR (low energy nuclear reactions).*

**Key words:** *plasma physics, controlled thermonuclear fusion, thermonuclear reactors, Euratom, ITER, tokamak, stellarator, «Bulat», «cold nuclear fusion».*

## **ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ: ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ (1950–2017)**

*На основе исторического и проблемно-хронологического анализа исследованы сложнейшая научная и техническая проблема физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза (УТС) – создание экономически эффективных термоядерных реакторов, которые в перспективе могут стать основой энергетики нового поколения. Исследования по физике плазмы были начаты в 50-х гг. прошлого века, в частности, впервые в Украине, в Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ). Харьковские физики являются безусловными лидерами исследований и разработок в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза и остаются ими и поныне. В институте была разработана и построена серия крупных установок – стеллараторов типа «Ураган» для магнитного удержания высокотемпературной плазмы. Успехи ХФТИ стимулировали развитие исследований стеллараторов в Германии и Японии. Интенсивная работа по исследованию физики плазмы и проблемы УТС дала результаты в сопутствующих направлениях. Так, широкое внедрение в промышленности, в т. ч. за рубежом, получила разработанная в ХФТИ ионно-плазменная технология нанесения покрытий на установках «Буллат», значительно повышает режущую износостойкость инструмента и деталей машин. Проблема УТС постоянно находится в поле зрения Национальной академии наук и Правительства Украины. Приведены материалы рассмотрения проблемы УТС как основы энергетики будущего и ее технологических применений. На основе гибридной схемы «синтез-деление» можно предложить новый подход к обеспечению топливного баланса масштабной ядерной энергетики и утилизации отработанного ядерного топлива. Уделено внимание предложениям из научных учреждений НАН Украины по участию в европейской исследовательской термоядерной программе ЕВРАТОМ. ЕС является главным донором строительства первого экспериментального термоядерного реактора ITER, который сейчас строится в г. Кадараш (Франция) в рамках одного из самых грандиозных международных проектов, в реализации которого принимают также участие США, Россия, Япония, Китай, Южная Корея и Индия. Сложности создания коммерческого термоядерного реактора побудили поиск альтернативных путей использования энергии синтеза легких ядер, так называемый «холодный ядерный синтез», или LENR (low energy nuclear reactions).*

Відомо, що *енергетичні проблеми* стимулюють пошуки нетрадиційних шляхів задоволення енергетичних потреб в країнах світу. Поряд з традиційною вуглеводневою енергетикою нині активно розвиваються нові енерготехнології, продовжує грати суттєву роль найістотніша альтернатива вуглеводній атомна енергетика, а розвинені країни реалізують глобальний проєкт зі створення міжнародного термоядерного реактору. Історія досліджень, пов'язаних зі створенням так званого термоядерного реактору – одна з найдраматичніших сторінок в розвитку загалом фізики, техніки і матеріалознавства і існує вже понад 50 років. Проблема термоядерного синтезу («термояду») потребує всебічного і глибокого аналізу своєї історії, пошуку можливих подальших шляхів розвитку. У зв'язку з цим, метою даної роботи є відтворення еволюції наукової думки у вирішенні фундаментальної проблеми керованого термоядерного синтезу і створення на його основі енергетичного реактору.

Надважливій проблемі пошуку альтернативних видів енергоджерел і, зокрема, термоядерній енергетиці, присвячено праці багатьох вчених, як вітчизняних, так і зарубіжних. Перспективи розвитку термоядерної енергетики в розвинених країнах світу і Україні розглянуто в працях І.Ю. Матюшенко [7]. Опис альтернативного варіанту здійснення термоядерного синтезу дано в статтях В. Висоцького за матеріалами вченого і конструктора з Італії А. Россі [8–9]. В галузі керованого термоядерного синтезу працює велика спільнота вчених Харкова, Києва, інших міст України і світу. В основній частині дослідження буде наведено імена вчених, які стояли у витоків «термояду» і тих, хто плідно працює в даній галузі наразі.

Серед фізиків побутує старий жарт про те, що комерційний реактор керованого термоядерного синтезу стане реальністю не більше, ніж через 30 років. Але цьому жарту вже років 80, і маємо в ньому (жарті) гірку іронію (портал «livescience.com»). Історія розвитку досліджень із фізики плазми і керованого термоядерного синтезу (КТС) є прикладом того, якими непередбачуваними

можуть бути шляхи прогресу в природознавстві і техніці. Поштовхом до виникнення досліджень даного напрямку у 50-х рр. ХХ ст. слугувало розуміння того, що запаси органічного палива і, навіть палива для атомних реакторів, обмежені та їх вистачить не надовго. Ця обставина стимулювала пошук нових енергоджерел. Великі надії покладались на термоядерний синтез, який у перспективі може дати змогу одержати екологічно чисте, практично безпечне та невичерпне джерело енергії. Під термоядерним синтезом розуміють цікавий клас ядерних реакцій синтезу легких ядер з утворенням ядер важчих і виділенням енергії в значно більших масштабах, ніж в процесах ділення важких атомів в ядерних реакторах [1; 2]. Реакції проходять при дуже високій температурі, звідси їх назва «термоядерні». «Пальне» знаходиться в стані плазми, іонізованого газу ізотопів водню (дейтерію, тритію), запаси яких в земних умовах у звичайній воді необмежені. Така реакція в 1953 р. була здійснена в СРСР у вигляді надпотужного вибуху термоядерної («водневої») бомби. Прикладом термоядерного реактора є Сонце, де в гігантських масштабах ідуть процеси синтезу з виділенням колосальної енергії. Завдання фізики плазми як науки – знайти умови мирного використання енергії термоядерних реакцій. Так в світі з'явилася проблема КТС – керований термоядерний синтез.

Починалися дослідження з фізики плазми в 50-х рр. минулого століття, зокрема, вперше в Україні, в Харківському фізико-технічному інституті (ХФТІ) під керівництвом К.Д. Синельникова з ініціативи І.В. Курчатова. Харківські фізики є беззаперечними лідерами досліджень і розробок в галузі фізики плазми і керованого термоядерного синтезу і залишаються ними і понині. Теоретичні передумови до появи досліджень у фізиці плазми містилися в низці фундаментальних робіт, виконаних в УФТІ Л.Д. Ландау (1936), А.І. Ахієзером і Я.Б. Файнбергом (1948), А.І. Ахієзером і Л.Е. Паргаманніком в наступні роки. З 1966 р. всі роботи з фізики плазми та проблеми КТС в ХФТІ очолює учень академіка К.Д. Синельникова В.Т. Толоч У ході виконання завдання академіка

І.В. Курчатова в інституті була розроблена і споруджена серія великих установок – стелараторів типу «Ураган» для магнітного утримання високотемпературної плазми [1]. Успіхи ХФТІ стимулювали успішний розвиток досліджень стелараторів у Німеччині та Японії.

На жаль, суттєвих досягнень в утриманні плазми не було досягнуто. Проблема виявилась надто складною. Інтенсивна робота з дослідження фізики плазми і проблеми КТС дала результати у супутніх напрямках. Так, було споруджено унікальний квазістаціонарний прискорювач високоенергетичних потоків плазми, який використовується для вивчення взаємодії плазми з поверхнею твердих тіл. Широке впровадження в промисловості, у т. ч. за кордоном, набула розроблена у відділенні фізики плазми іонно-плазмова технологія нанесення покриттів на установках «Булат», значно підвищує зносостійкість різального інструменту і деталей машин. Тисячі «Булатів» виготовлені за спеціальними постановами урядів СРСР і України.

Плазмова електроніка (ХФТІ, ХНУ) – новий напрям у фізиці плазми, заснований академіком Я.Б. Файнбергом і успішно розвивається учнями його школи. Дослідження мають важливе наукове і прикладне значення. Вивчається широке коло явищ, пов'язаних з колективними процесами, які виникають при взаємодії потоків заряджених частинок з плазмою. Розроблено новий спосіб нагріву плазми – турбулентний, способи генерування надвисоких частот, нові ефективні методи прискорення елементарних частинок. Ці дослідження проводяться в Інституті плазмової електроніки і нових методів прискорення ННЦ «ХФТІ».

Кафедра фізики плазми фізико-технічного факультету ХНУ, по суті, веде свою історію ще з 1936 р. [1], коли професор К.Д. Синельников почав керувати кафедрою електронних і іонних процесів на фізичному факультеті університету. Ще в кінці 40-х рр. минулого століття в низці провідних вузів Харкова, Києва, Дніпропетровська було запроваджено підготовку фахівців з проблем ядерної

енергетики. Зокрема, на фізико-математичному факультеті Харківського університету було відкрите ядерне відділення, на якому готувались спеціалісти для ХФТІ і інших інститутів. У 1956 р. К.Д. Синельников ініціював роботи з фізики газового розряду, зондових вимірів параметрів плазми, почав читати курс фізики плазми. У 1962 р. кафедра фізики плазми була офіційно представлена в штатному розкладі ХДУ. Її першим завідувачем був професор К.Д. Синельников, співробітниками: Г.А. Мілютін, С.А. Тіктін, А.П. Страшко, Є.І. Єрмолович, сумісниками: Е.С. Боровик та Б.Н. Руткевич. Тематика кафедри природним чином погоджувалася з програмою робіт у ХФТІ, де К.Д. Синельников керував дослідженнями у відділі фізики плазми. У 1966–1971 рр. кафедрою за сумісництвом завідував В.Т. Толок. На кафедрі вивчалася взаємодія плазми з поперечним магнітним полем, її поведінка в схрещених електричному і магнітному полях, досліджувалися колективні процеси в потужнострумовому газовому розряді, розроблялися способи нанесення покриттів різного призначення. Зокрема, запропоновано новий спосіб нанесення зміцнюючих покриттів на матеріали з низькою температурою відпустки. Цим закладено основи «тонкої», атомно-іонної металургії, створення нових матеріалів на рівні елементарних частинок [1].

Проблема КТС постійно знаходиться в полі зору Національної академії наук і Кабінету Міністрів України [3–6]. На засіданні Президії НАН України [4, 6] наголошено, що актуальність і комплексність проблеми КТС охоплює не лише різні напрями фізики високотемпературної плазми, як основи енергетики майбутнього, та її технологічних застосувань, а й проблеми термоядерних реакторів, матеріалознавчі та інженерні аспекти термоядерної енергетики тощо. Ця галузь потребує розроблення матеріалів для термоядерних реакторів, дослідження їхньої поведінки в екстремальних умовах, створення нових покриттів і сполук, методів з'єднання та зварювання, нових методів діагностики, новітніх інженерних розробок у сферах сильнострумної електроніки, енергетики,

турбобудування тощо. «...На основі гібридної схеми «синтез–ділення» можна запропонувати новий підхід до забезпечення паливного балансу масштабної ядерної енергетики й утилізації відпрацьованого ядерного палива» [5].

Перший експериментальний термоядерний реактор ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) нині будують у французькому містечку Кадараш поблизу Марселя в рамках одного з найграндіозніших міжнародних проектів, у реалізації якого беруть участь США, Росія, Євросоюз, Японія, Китай, Південна Корея та Індія. Основним завданням цього проекту є досягнення стаціонарної термоядерної реакції дейтерію і тритію з виділенням енергії на рівні 500 МВт, що заплановано здійснити у 2018 р. після введення реактора в експлуатацію. Початок використання керованої термоядерної енергії у промислових масштабах прогнозується вже через два десятиліття [5].

Дослідження з керованого термоядерного синтезу були інтернаціональними із самого початку їх становлення в 50-х роках минулого століття. У Європейському Союзі дослідження високотемпературної плазми проводять у межах єдиної програми, фінансування якої становить понад 90% видатків на дослідження Євратому, причому лише на 2012–2014 рр. було виділено більш як 2,2 млрд євро. Аналогічні скоординовані програми є в США, Японії, Росії, Китаї, Індії, Бразилії та інших країнах [5].

Вирішення завдань інноваційного розвитку країни та інтеграція України до світового наукового простору стимулюють приєднання нашої країни до міжнародних термоядерних програм, зокрема програми Євратому. Дієвим інструментом для цього є Угода про співробітництво між Кабінетом Міністрів України та Європейським співтовариством з атомної енергії в галузі керованого термоядерного синтезу, ратифікована Законом України від 07.03.2002 р. № 3104-III (3104-14) [4]. Вона передбачає значну активізацію зусиль у цьому напрямі.

У зв'язку з тим, що Україна офіційно не входить до об'єднання країн, задіяних у спорудженні реактора ITER, її участь у проекті обмежується



вирішенням окремих допоміжних завдань у межах співробітництва з лабораторіями Європи і Росії. Для розв'язання зазначених проблем установи НАН України мають певні наукові здобутки, кваліфіковані кадри і відповідну матеріально-технічну базу – найбільший у Європі стеларатор «Ураган-2М», який було введено в дію 2006 р., торсатрон «Ураган-3М», електромагнітну пастку «Юпітер-2М», найпотужніший у світі квазістаціонарний прискорювач плазми КСПП Х-50 та інші термоядерні установки. Нині будується плазмовий прискорювач нового покоління для дослідження матеріалів ядерної й термоядерної енергетики в екстремальних умовах. Роботи з теорії та чисельного моделювання процесів у термоядерних системах, діагностики плазми, вирішення проблем матеріалів і технологій термоядерного реактора активно розвиваються в таких наукових установах НАН України, як Інститут фізики плазми ННЦ ХФТІ, Інститут ядерних досліджень, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ ХФТІ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Інститут прикладної фізики, а також у Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, НТУ «Львівська політехніка», Київському національному університеті ім. Тараса Шевченка та ін.

У НАН України діє Наукова рада з фізики плазми та плазмової електроніки, у межах якої представники провідних установ НАН України й організацій МОН України здійснюють дослідження в напрямі фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та технологічних застосувань плазми. За рішенням уряду України Координаційний комітет з виконання угоди про співробітництво між Україною та ЄС у галузі керованого термоядерного синтезу сформовано з числа співробітників НАН України.

У рамках виконання Державної програми фундаментальних і прикладних досліджень із проблем використання ядерних матеріалів, ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки, Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку

ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки», бюджетної тематики установи НАН України та заклади МОН України здійснили комплекс досліджень, спрямованих на вирішення цілого спектра проблем термоядерної енергетики. Зокрема, розвинуто методи високочастотного створення і нагрівання плазми, досліджено поведінку енергійних частинок у магнітних пастках, розроблено нові методи діагностики високотемпературної плазми, проведено експериментальні дослідження поведінки конструкційних матеріалів першої стінки та дивертора в умовах екстремальних корпускулярних і енергетичних навантажень, що властиві термоядерному реактору.

На основі результатів фундаментальних досліджень із фізики плазми останніми роками одержано низку важливих прикладних розробок. Це нові методи нанесення функціональних покриттів, модифікація матеріалів потужними потоками плазми, плазмові джерела інтенсивного екстремального ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, плазмові озонатори, низькотемпературні плазмові озонно-ультразвукові стерилізатори, геліконні технологічні джерела, плазмохімічні реактори, пароплазмова технологія переробки органічних відходів тощо. Одними з найважливіших прикладних завдань розвитку цього напрямку в Україні є створення нових перспективних екологічно чистих плазмових технологій для промисловості, медицини, сільського господарства та охорони довкілля. Разом з тим, організація вітчизняних наукових досліджень і технологічних розробок у галузі керованого термоядерного синтезу, фізики плазми і плазмових технологій потребує повноцінного фінансового забезпечення, реалізації скоординованої програми розвитку досліджень високотемпературної плазми як основи енергетики майбутнього та її новітніх технологічних застосувань, активізації міжнародного співробітництва, вдосконалення системи підготовки висококваліфікованих фахівців [5].

Перспективи розвитку в Україні фундаментальних досліджень із фізики високотемпературної плазми та її технологічних застосувань, проблем

термоядерних реакторів, матеріалознавчих та інженерних аспектів термоядерної енергетики, з огляду на міжнародний характер, комплексність і пріоритетність проблеми керованого термоядерного синтезу у світі станом на 2017 р. розглянуто на засіданні Президії НАН України у доповіді директора Інституту фізики плазми ННЦ ХФТІ чл.-кор. НАН України І.Є. Гаркуші [6]. Велику увагу приділено заходам з якнайширшого залучення наукових установ НАН України до участі в європейській дослідницькій термоядерній програмі ЄВРАТОМ. (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. 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 [6].

Найвагомішим результатом, отриманим у ЄС останнім часом, є введення в дію найбільшого у світі надпровідного стеларатора Wendelstein 7-X, який знаходиться в Інституті фізики плазми Товариства Макса Планка в німецькому м. 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, що дає привід для оптимізму у вирішенні проблеми КТС. 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 наукових установах: 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 приймати участь у роботі міжнародних дослідницьких центрів, отримувати додаткове фінансування наукових робіт в Україні та поїздок українських науковців за кордон тощо.

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 НАН України, Інституті фізики плазми ННЦ ХФТІ, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна [6].

Складнощі створення комерційного термоядерного реактора спонукали пошук альтернативних шляхів використання енергії синтезу легких ядер. Так, І.Ю. Матюшенко [7] вважає, що наразі проблема створення термоядерної енергетики більше технічна і економічна, ніж фізична, оскільки для створення економічно вигідних електростанцій необхідно вирішити дві принципові і надскладні задачі: продовжити створення нових матеріалів, які здатні витримувати суворі умови експлуатації; створення нових технологій, які відносяться до дистанційного керування, конструкції оболонок, топливних циклів тощо. Автор вважає, що вихід із енергетичного тупика може дати «холодний ядерний синтез», тобто процес реалізації безопарних ядерних реакцій за низьких

температур, наприклад, на основі нанопорошків нікелю і водню, що здійснюється у відповідному тепловому генераторі.

Вважається [7–9], що прогрес в дослідженнях КТС може бути пов'язаний з вирішенням проблеми LENR (low energy nuclear reactions) або «холодного ядерного синтезу», тобто перспективи створення та використання реальної альтернативи традиційному вуглеводневому паливу і не менш традиційній «урановій» ядерній енергетиці – процесу реалізації цілком безпечних ядерних реакцій при низькій енергії, наприклад, на основі нанопорошку нікелю й водню, здійснюваного в так званому тепловому генераторі E-Cat Андреа Россі (Andrea Rossi) [2]. Дана проблема доволі детально обговорюється в статтях В. Висоцького [8, 9], де розглянуто перспективи створення та використання процесу реалізації цілком безпечних ядерних реакцій при низькій енергії на основі нанопорошку нікелю й водню, здійснюваного в тепловому генераторі. Процеси, що сприяють таким реакціям, виявилися практично недослідженими в ядерній фізиці, яка з моменту зародження формувалася фактично на концепції використання заряджених частинок високої енергії або за наявності дуже високої температури плазми, яка складається з цих частинок, що необхідно для подолання кулонівського бар'єра. До останнього часу здавалося, що ця концепція безальтернативна і є якимось непорушним постулатом. Але у 2011 р. італійський інженер А. Россі разом з професором С. Фокарді (Sergio Focardi) з університету Болоньї продемонстрували реально працюючий тепловий генератор на основі цих процесів, який одержав назву E-Cat (каталізатор енергії). Після кількох успішних і вражаючих демонстрацій в Італії, які завершилися презентацією в жовтні 2011 р. працюючого генератора потужністю 1 МВт, А. Россі переніс свої дослідження в США. Там він створив більш ефективний генератор НТ E-Cat з підвищеною до 1000–1200 градусів за Цельсієм температурою робочої камери і, відповідно, можливістю використання перегрітої пари з температурою близько 600 градусів, що ідеально узгоджується з вимогами, необхідними для ефективної роботи турбін

сучасних електрогенераторів. Із численних публікацій відомо, що А. Россі мав зустрічі з вищим керівництвом США, а його дослідження прямо пов'язані з NASA та NEVY (космічне агентство та військово-морські сили) й іншими державними структурами США. Інтерес до теплового генератора E-Cat А. Россі проявлено в Японії, Індії, Китаї. Паралельно з токамаками існують ще альтернативні основному варіанти, які розглядають вчені в Сполучених Штатах. Найбільш перспективним вважається метод з інерційним утриманням плазми. В цьому випадку паливні таблетки, що містять дейтерій і тритій, нагріваються лазерними променями чи пучками іонів. При швидкому нагріванні таблетки стискаються або вибухають, змушуючи ядра водню зливатися з виділенням енергії [2]. Залишається очікувати результатів виконання численних проектів термоядерних генераторів на основі нової технології холодного ядерного синтезу, варіантів із застосуванням потужних лазерів.

Отже, проблема керованого термоядерного синтезу і створення економічного енергетичного реактора, яка поставлена і вирішується з 50-х рр. ХХ ст., в суто науковому плані виглядає достатньо вивченою, але в технічному і технологічному відношенні через надскладні труднощі її здійснення далека від вирішення. За прогнозами фахівців для створення реактора на основі КТС потрібно ще декілька десятиліть. У зв'язку з важливістю даної проблеми уряди розвинених країн світу (ЄС, США, Великобританія, Німеччина, Франція, Японія, Індія, ін.) прикладають великі зусилля для вирішення проблеми. Фінансування досліджень в галузі керованого термоядерного синтезу досягло безпрецедентно високих розмірів. Україна приймає посильну участь в міжнародних проектах в галузі термоядерного синтезу. У зв'язку зі складністю «класичного» варіанту здійснення термоядерного синтезу (за надвисокої енергії частинок) запропоновані альтернативні проекти термоядерних генераторів, заснованих на використанні потужних лазерів, технології холодного ядерного синтезу тощо. Наскільки буде виправданою побудова таких реакторів, покаже час.

## Список використаних джерел та літератури

1. Толлок В. Т., Коган В. С., Власов В. В. Физика и Харьков. Харьков : Тимченко, 2009. 408 с.
2. Заец И. Термоядерный век. *Эксперт*. 2009. № 50. С. 46–50.
3. Из зали засідань Президії НАН України (18 вересня 2013 р.). *Вісник Національної академії наук України*. 2013. № 11. С. 127–133. URL : [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu\\_2013\\_11\\_18.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2013_11_18.pdf) (дата звернення : 22.08.2019).
4. Державна програма фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів та ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки на 2004–2010 рр. : Постанова Кабінету Міністрів України від 08.09.2004 р. № 1165. URL : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1165-2004-п> (дата звернення : 24.08.2019).
5. Концепція цільової комплексної програми НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» на 2014–2016 роки : додаток 1 до Постанови Президії НАН України від 18.03.2013 р. № 115. URL : [http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs\\_/130918\\_115\\_1.pdf](http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs_/130918_115_1.pdf) (дата звернення : 22.08.2019).
6. Гаркуша І. Є. Про міжнародну співпрацю в галузі керованого термоядерного синтезу в рамках дослідницьких програм ЄВРОАТОМ. *Вісник Національної академії наук України*. 2017. № 7. С. 37–43.
7. Матюшенко І. Ю. Перспективи розвитку термоядерної енергетики в розвинених країнах світу і Україні. *Проблеми економіки*. 2014. № 4. С. 40–46.
8. Висоцький В. «Бридке каченя» ядерної фізики та можливий прогрес світової енергетики. *Дзеркало тижня*. 2014. № 24. С. 12.
9. Висоцький В. Чи виросте білий лебідь із бридкого каченяти? Нові результати термоядерних досліджень здатні кардинально змінити ставлення до ядерної енергії, масштабів її виробництва і використання. *Дзеркало тижня*. 2014. № 45. С. 12.

## References

1. Tolok, V. T., Kohan, V. S. and Vlasov, V. V. (2009). *Fyzyka i Kharkov* [Physics and Kharkov]. Kharkov : Timchenko, 408. [in Russian].
2. Zaets, Y. (2009). *Termojadernyi vek* [Thermonuclear age]. *Ekspert* [Expert]. 50. 46–50. [in Russian].
3. (2013). *Iz zaly zasidan Prezydii NAN Ukrainy (18 veresnia 2013 roku)* [From the Meeting Room of the NAS Presidium (September 18, 2013)]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 11.

127–133. [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu\\_2013\\_11\\_18.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2013_11_18.pdf) (date of treatment : 22.08.2019). [in Ukrainian].

4. (2004). *Derzhavna prohrama fundamentalnykh i prykladnykh doslidzhen z problem vykorystannia yadernykh materialiv ta yadernykh i radiatsiinykh tekhnolohii u sferi rozvytku haluzei ekonomiky na 2004–2010 rr. : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 08.09.2004 r. № 1165* [State Program of Fundamental and Applied Research on the Problems of the Use of Nuclear Materials and Nuclear and Radiation Technologies in the Field of Economic Sector Development for 2004–2010 : Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1165 of September 8, 2004]. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1165-2004-p> (last accessed : 24.08.2019). [in Ukrainian].

5. (2013). *Kontseptsia tsilovoi kompleksnoi prohramy NAN Ukrainy «Perspektyvni doslidzhennia z fizyky plazmy, kerovanoho termoiadernoho syntezy ta plazmovykh tekhnolohii» na 2014–2016 roky : dodatok 1 do Postanovy Prezydii NAN Ukrainy vid 18.03.2013 r. № 115* [The Concept of the Target Comprehensive Program of NAS of Ukraine «Prospective Studies in Plasma Physics, Controlled Fusion and Plasma Technologies» for 2014–2016 : Annex 1 to the Resolution of the Presidium of NAS of Ukraine of March 18, 2013 No. 115]. [http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs/\\_/130918\\_115\\_1.pdf](http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs/_/130918_115_1.pdf) (last accessed : 22.08.2019). [in Ukrainian].

6. Harkusha, I. E. (2017). *Pro mizhnarodnu spivpratsiu v haluzi kerovanoho termoiadernoho syntezy v ramkakh doslidnytskykh prohran EVROATOM* [On international cooperation in the field of controlled thermonuclear fusion within the framework of Euroatom research programs] *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 7. 37–43. [in Ukrainian].

7. Matiushenko, I. Yu. (2014). *Perspektyvy rozvytku termoiadernoi enerhetyky v rozvynenykh krainakh svitu i Ukraini* [Prospect for the development of thermonuclear energy in the rooted regions of Ukraine and Ukraine]. *Problemy ekonomiky* [Problems of Economy]. 4. 40–46. [in Ukrainian].

8. Vysotskyi, V. (2014). «*Brydke kachenia*» yadernoi fizyky ta mozhlyvyi prohres svitovoi enerhetyky [«Nuclear duckling» of nuclear physics and the possible progress of world energy]. *Dzerkalo tyzhnia* [The mirror of the week]. 24. 12. [in Ukrainian].

9. Vysotskyi, V. (2014). *Chy vyroste bilyi lebid iz brydkoho kacheniaty? Novi rezultaty termoiadernykh doslidzhen zdatni kardynalno zminyty stavlennia do yadernoi enerhii, masshtabiv yii vyrobnytstva i vykorystannia* [Will a white swan grow out of a nasty duckling? New results of fusion research can dramatically change the attitude to nuclear energy, the scale of its production and use]. *Dzerkalo tyzhnia* [The mirror of the week]. 45. 12. [in Ukrainian].

**Рецензент:**

**Рогожа М.М., д.і.н., доцент**  
**Салата Г. В., д.і.н., доцент**

**Надійшла до редакції 29.08.2019 р.**