ТЕРМОЯДРЕНИЯТ СИНТЕЗ – БЪДЕЩЕТО В СВЕТОВНАТА ЕНЕРГЕТИКА

Гл. ас. д-р Георги Георгиев Димитров, g.dimitrov@unwe.bg
Катедра „Икономика на транспорта и енергетиката“
Университет за национално и световно стопанство

Резюме: Термоядреният синтез представлява физичен процес, при който леки атомни ядра се обединяват, за да образуват по-тежки ядра, като при това се отделят значителни количества енергия. В условията на непрекъснато нарастващо глобално енергийно потребление, изчерпване на запасите от изкопаеми горива и нарастваща необходимост от ограничаване на въглеродните емисии, термоядреният синтез все по-често се разглежда като една от най-перспективните възможности за бъдещото развитие на световния енергиен сектор. Въпреки добре установеното теоретично разбиране на процеса, практическата реализация на контролиран термоядрен синтез остава изключително сложен научен и технологичен проблем. Настоящата статия има за цел да разгледа принципите на термоядрения синтез, да направи обзор на съвременните подходи и мащабни експериментални проекти, насочени към неговото реализиране, както и да се направи икономическа обосновка на инвестициите в термоядрени технологии и да се анализират основните предизвикателства за бъдещото му развитие като устойчив енергиен източник.

Ключови думи: термоядрен синтез, енергийни източници, глобална енергетика

JEL: L94, Q42

DOI: https://doi.org/10.58861/tae.di.2026.3.04

THERMONUCLEAR FUSION – THE FUTURE OF GLOBAL ENERGY

Head Assist. Prof. Georgi Georgiev Dimitrov, PhD, g.dimitrov@unwe.bg
Department of Transport and Energy Economics
University of National and World Economy

Abstract: Fusion is a physical process in which light atomic nuclei combine to form heavier nuclei, releasing significant amounts of energy. In the face of ever-increasing global energy consumption, depletion of fossil fuel reserves, and the growing need to limit carbon emissions, fusion is increasingly seen as one of the most promising options for the future development of the global energy sector. Despite a well-established theoretical understanding of the process, the practical implementation of controlled fusion remains an extremely complex scientific and technological problem. The purpose of this article is to examine the principles of fusion, to review modern approaches and large-scale experimental projects aimed at its implementation, as well as to make an economic justification for investments and to analyze the main challenges for its future development as a sustainable energy source.

Key words: thermonuclear fusion, energy sources, global energy

JEL: L94, Q42

DOI: https://doi.org/10.58861/tae.di.2026.3.04

ТЕРМОЯДРЕНИЯТ СИНТЕЗ – БЪДЕЩЕТО В СВЕТОВНАТА ЕНЕРГЕТИКА

Гл. ас. д-р Георги Георгиев Димитров, g.dimitrov@unwe.bg
Катедра „Икономика на транспорта и енергетиката“
Университет за национално и световно стопанство

Въведение

Термоядреният синтез представлява процес на сливане на леки атомни ядра с освобождаване на значително количество енергия. Технологията се разглежда като потенциално решение на глобалните енергийни проблеми, предлагайки практически неограничен, устойчив и безопасен източник на електрическа енергия (ITER Organization, 2023). Основният принцип на термоядрения синтез се състои в преодоляване на електростатичното отблъскване между положително заредените атомни ядра, чрез достигане на изключително високи температура и налягане, при които веществото преминава в състояние на плазма[1] (Chen, 2016). Най-изследваната реакция за практически приложения е тази между деутерий и тритий, която се характеризира с относително висока вероятност на протичане и висок енергиен добив (IAEA, 2024).

Съвременните изследвания в областта на термоядрения синтез се развиват в няколко основни направления, сред които водещо място заемат методите за магнитно или за инерционно задържане на плазмата. При магнитното задържане плазмата се конфинира чрез силни магнитни полета в специализирани устройства като токамаци и стеларатори (Wesson, 2011). От своя страна, инерционният синтез използва мощни лазерни или йонни импулси за компресиране и нагряване на малки количества гориво до екстремни състояния за изключително кратки времеви интервали (Lindl, 1995). Всеки от тези два напълно различни подхода има своите предимства и ограничения, като изборът на оптималната технология продължава да е предмет на изключително интензивни научни изследвания.

Термоядреният синтез следва да бъде разглеждан не само като научно-техническо предизвикателство, но и като стратегическа инвестиция в бъдещето на световната енергийна система. Неговото успешно развитие със сигурност ще доведе до съществена трансформация на енергийния сектор, като осигури надежден, безопасен и екологично устойчив източник на енергия (ITER Organization, 2023). Това от своя страна ще има изключително големи икономически, социални и геополитически последици, включително значително намаляване на зависимостта на отделните държави от ограничените (вносни) изкопаеми природни ресурси и устойчиво стабилизиране на глобалните енергийни пазари.

[1] Плазма е четвъртото агрегатно състояние на веществото след твърдо, течно и газообразно. Състои се от свободни електрони и положително заредени йони, поради което тя може да провежда електричество и да реагира на магнитни полета.

1. Същност на термоядрения синтез

Термоядреният синтез предимно се основава на реакцията между деутерий и тритий (най-подходящата комбинация за ядрен синтез), която води до образуване на хелий и неутрон и се освобождава голямо количество енергия. Съществуват два основни подхода за контролирана термоядрена реакция, чрез магнитно задържане на плазмата и чрез инерционно ограничаване.

1.1. Магнитно задържане

Системите „Токамак“ и „Стеларатор“ използват интензивни магнитни полета за задържане на плазмата. И двете системи са предназначени да удържат плазма при изключително високи температури (милиони градуси), за да може да се постигне термоядрен синтез. Тъй като плазмата е електрически заредена, тя може да се контролира с магнити.

В системите „Токамак“ плазмата е проводник, през който се индуцира ток, създаващ допълнително магнитно поле, което стабилизира плазмата. Предимствата са добрата конфигурация за задържане на плазмата, и че вече експериментално са достигнати много високи температури и плътност на плазмата. Недостатъците се основават на това, че е нужен ток в плазмата, което води до проблеми с продължителността на излъчване, а при силни токове плазмата може да стане изключително нестабилна. Технологията „Токамак“ е основа на експерименталните реактори ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), Франция и JET – (Joint European Torus), Великобритания. Изисква значителни първоначални инвестиции, но позволява производство на големи количества енергия с минимални оперативни разходи в дългосрочен план. За постигане на положителен енергиен баланс са необходими висока температура (над 100 милиона °C), плътност на плазмата и време на задържане (Stacey, 2010). Това определя изискванията за инфраструктура и капиталови вложения, което е основен фактор за икономическата жизнеспособност.

При системите „Стеларатор“ магнитното поле се създава изцяло от външни магнити. Въртящата се и сложна форма на магнитните бобини генерира поле, което автоматично завива плазмата в тороида, без нужда от ток в плазмата. Предимствата са, че плазмата може да се задържа постоянно, без импулсна работа, което води до по-стабилна конфигурация при продължителни операции. Недостатъците на системите „Стеларатор“ са свързани с изключително сложната конструкция на магнитите (трудно и скъпо производство) и все още не са достигнати толкова високи плътност и температура, като в токамак. Венделщайн 7-X (Wendelstein 7-X) е експериментален стеларатор – вид термоядрен реактор, предназначен да демонстрира стабилна и продължителна плазмена конфигурация. Разположен е в Германия и е най-големият стеларатор в света. Той е ключов проект за изследване на управляемия ядрен синтез като бъдещ източник на чиста енергия. Реакторът не е предназначен за енергийно производство, а за тестване на физическите принципи, нужни за бъдещи енергийни установки.

1.2. Инерционно задържане

Методът използва импулсно компресиране на горивни капсули с лазери или частици. Технологията изисква високи инвестиции в лазерни системи и поддръжката им, което увеличава значително оперативните разходи. Основен

проект разчитащ на този метод е NIF – National Ignition Facility (LLNL, 2024). През 2011 година в Калифорния (САЩ) започват експерименти, като се използват капсули с деутерий и тритий, бомбардирани с голям брой лазери – процес, наречен термоядрен синтез с инерционно ограничаване. Първоначално освободената енергия е само малка част от вложената от лазерите, но с течение на времето се увеличава, докато през декември 2022 година се стига до пробив (запалване). Осъществена е термоядрена реакция, която изхвърля повече енергия от тази на вложената в лазерите (необходимата енергия за стартирането на реакцията).

Изборът на подходяща технология за производство на енергия чрез термоядрен синтез има директен икономически ефект, тъй като влияе върху капиталовите разходи, експлоатационните разходи и възможността за бъдеща комерсиализация (WNA, 2026).

В България ядреният синтез е предмет на интензивни научни изследвания, основно в рамките на Българската академия на науките. Проектите са фокусирани предимно върху лазерно индуциран нискотемпературен синтез, като целта е оптимизиране на процесите за постигане на стабилна и контролирана енергийна реакция (Kovachev, Iordanova, Yankov, & Angelov, 2025). Тези изследвания са от значение както за фундаменталната наука, така и за експерименталното внедряване на иновативни технологии, които могат да се адаптират към индустриалното производство на енергия.

Използването на фемтосекундни лазери за индуциране на синтезни реакции показва сериозен потенциал за бъдещо развитие и внедряване на малки (компактни) и по-икономически ефективни прототипни системи, които могат да намерят приложение в редица сектори на икономиката, като например в областта на железопътния транспорт (Dimitrov, 2022), който се захранва основно с електрическа енергия.

2. Икономическа обосновка на инвестициите в термоядрен синтез

Изграждането и експлоатацията на термоядрен реактор изисква значителни първоначални капиталови вложения. Експерименталният реактор ITER представлява мащабна инвестиция от над 20 милиарда евро, включително разходи за инфраструктура, оборудване и научни изследвания (ITER Organization, 2025). Международният термоядрен експериментален реактор (ITER) е разположен на територията на Франция, но представлява глобален проект с членове: Европейският съюз, САЩ, Китай, Индия, Япония, Русия и Южна Корея. Великобритания е член на ITER до излизането си от Европейския съюз (Брекзит), а след спирането от експлоатация (през 2023 година) на проект JET[2] – Joint European Torus (Rebut, Bickerton & Keen, 1985) се съсредоточава върху самостоятелни изследвания в тази област. Първоначално се планира ITER да бъде изграден за около 5 млрд. евро и да започне опити през 2020 година. Бюджетът нараства на над 20 млрд. евро, без към настоящия момент да е определена конкретна дата за стартиране провеждането на изпитанията. Прогнозните разходи за строителството, експериментите и предстоящата

[2] Joint European Torus (JET) е най-големият и най-успешен (досега) експериментален термоядрен реактор в Европа. JET приключи с активните експерименти през 2023 г., но данните се използват за ITER и други експериментални проекти, като остава изключително важен и ключов източник на научна информация.

експлоатация на международния експериментален термоядрен реактор са представени в таблица 1.

Експерименталният термоядрен реактор е изключително сложна машина, която се изгражда в Южна Франция. Сглобена е от над един милион части, произведени и доставени от цял свят, като дори проблеми с най-малките детайли и аномалии, водят до нарастване на разходите и до съществено забавяне в предвидените срокове с месеци или дори с години.

Таблица 1
Прогнозни разходи за строителство и експлоатация на международния експериментален термоядрен реактор (ITER)

Компонент	Информация	Стойност (млрд. евро)
Строителство ITER	Включва инфраструктура, технологии и оборудване	Над 20 млрд. евро
Оперативни разходи (годишно)	Персонал, поддръжка, енергия за стартиране	Между 0.5 – 1 млрд. евро
Гориво (годишни разходи)	Деутерий от вода, тритий от литий	Под 0.01 млрд. евро

Източник: ITER Organization

Годишните оперативни разходи на ITER се оценяват на 0,5-1 милиард евро, покривайки персонал, поддръжка и енергия за стартиране на реактора. В същото време необходимите разходи за гориво ще са минимални, тъй като деутерият[3] може да се извлича от морската вода, а тритият[4] е необходим в много малки количества и може да се произвежда от литий (ITER Organization, 2023).

Разходната структура показва, че първоначалните капиталови вложения са критичният фактор за икономическата жизнеспособност на проекта, докато горивото и оперативните разходи са сравнително ниски.

Възвръщаемостта на инвестициите зависи от продължителността на експлоатация, цената на електрическата енергия и наличието на финансови стимули за чиста (зелена) енергия. В таблица 2 са представени прогнозни данни публикувани от ITER за очакваната възвръщаемост на инвестициите в производство на енергия, чрез ползването на технологии за термоядрен синтез.

Прогнозните модели показват, че при производство на електроенергия в по-голямо количество от един тераватчас (TWh) годишно, инвестицията може да се възвърне в рамките на 20–25 години, а при годишно производство на над два тераватчаса (TWh), инвестицията се възвръща за период от 15 до 20 години (ITER Organization, 2023). Допълнителен фактор е икономията от въглеродни емисии и възможността за участие в международни програми за търговия с

[3] Деутерий (^2H) е стабилен изотоп на водорода. Ядрото му съдържа 1 протон и 1 неутрон за разлика от обикновеният водород, който има само 1 протон и няма неутрон.
[4] Тритий (^3H) е радиоактивен изотоп на водорода. Ядрото му съдържа 1 протон и 2 неутрона. Произвежда се чрез ядрени процеси, като облъчване на литий с неутрони, защото в природата се среща в незначителни количества.

кредити за въглероден диоксид. Тези възможности за допълнителни приходи увеличават финансовата привлекателност на проектите за термоядрен синтез.

Внедряването на технологиите за термоядрен синтез би довело до създаване на висококвалифицирани работни места и стимулиране образуването на индустриални клъстери. Международното сътрудничество около ITER създава хиляди директни и индиректни работни позиции, което води до повишаване на технологичното ниво и стимулиране на локалната икономика в отделните географски региони и държави.

Проектите за термоядрен синтез изискват персонал с висока квалификация – инженери, физици, специалисти по суперпроводници[5] и материалознание. Това води до силно положителен ефект върху образованието и развитието на научния потенциал на страните, които участват.

Таблица 2
Прогнозна възвръщаемост на инвестициите в производство на енергия чрез използването на технологии за термоядрен синтез

Сценарий	**Годишно производство на енергия**	**Очаквана годишна възвръщаемост на инвестицията**	**Прогнозен период за възвръщаемост на инвестицията**
Песимистичен	0.5 – 1 TWh	4 – 6 %	25 – 30 години
Базов	1 – 2 TWh	7 – 10 %	20 – 25 години
Оптимистичен	Над 2 TWh	11 – 15 %	15 – 20 години

Източник: ITER Organization

За по-прецизна икономическа обосновка на технологията за термоядрен синтез е необходимо да се направи прогнозен икономически модел на термоядрена електроцентрала като се разгледат показатели за капиталови разходи, годишно производство, цена на електроенергията, оперативни разходи, експлоатационен период и дисконтов процент (Whyte et al., 2026). Задължително трябва да се подчертае, че към настоящия момент все още няма работеща търговска термоядрена електроцентрала. Затова стойностите за капиталови разходи, експлоатационни разходи, производство и цена на произведената електроенергията са напълно прогнозни и зависят изключително силно от предвидената технология и разбира се от това дали разглеждаме възможността за първа централа, ранна серия централи или серийно (комерсиализирано) производство.

След като към момента все още няма изградена и функционираща термоядрена централа капиталовите разходи несъмнено са най-несигурният и непредвидим параметър. Актуално изследване (Araiinejad & Shirvan, 2025) показва иключително голямата неопределеност при оценките за капиталовите разходи на първите термоядрени централи – между 4 хил. и 18 хил. евро за

[5] Суперпроводници са материали, които провеждат електричество без никакво електрическо съпротивление, когато се охладят под определена критична температура. В суперпроводник токът може да циркулира много дълго време без загуба на енергия и без нагряване.

киловат (kW), като се подчертават голямата чувствителност към цената на специализираните компоненти и техническата сложност при производството им. Ако при така определения широк диапазон приемем, че нетната електрическа мощност на термоядрена електроцентрала е от 500 мегавата (MW) се получава общ размер на необходимите капиталови разходи за изграждане на централата от порядъка на между 2 млрд. и 9 млрд. евро.

Годишното производство на електроенергия не може да се изчисли само като мощността на централата се умножи по часовете в годината (8760), а трябва да се вземе в предвид и коефициентът на използване. Изчисленията показват, че при коефициент на използване от 50 % централа с мощност 500 мегавата (MW) годишно ще произвежда 2,19 тераватчаса (TWh) електроенергия, а при коефициент от 75 % произведената енергия за година значително ще нарасне до 3,29 тераватчаса (TWh). Логично е да се очаква, че коефициентът на използване ще бъде с по-ниски стойности при първите изградени термоядрени централи заради необходимостта от по-честа периодична поддръжка и подмяна на значителен брой компоненти, а при вече комерсиализирано производство очакванията са коефициентът на използване съществено да нарасне.

Продажната цена не трябва да се разглежда само като прогнозирана бъдеща пазарна цена. Тя представлява променлива стойност, която позволява да се оцени чувствителността на проекта към пазарните условия. За тази цел е необходимо да се предвидят различни сценарии. Това е особено важно, тъй като публикувани анализи (Araiinejad & Shirvan, 2025) показват изключително голям диапазон относно потенциалната себестойност на електроенергията, произведена чрез технологии за термоядрен синтез.

Оперативните разходи включват разходите за персонал, текуща поддръжка, резервни части, спомагателни системи, дистанционна поддръжка, управление на горивния цикъл, радиационен контрол и други разходи, свързани с експлоатацията (Chapman, 2025). Ако приемем, че оперативните разходи ще се равняват на 2,5 % от капиталовите разходи се получават стойносити от 50 млн. до 225 млн. евро годишно. Допълнително към оперативните разходи е необходимо да се предвидят и разходите за капиталови подмени на отделни части от оборудването и провеждането на планови ремонти.

За експлоатационен период на термоядрена електроцентрала може да се приеме срок от порядъка на 40-60 години като се предвидят и по около 10 години за изграждане и извеждане от експлоатация, а дисконтовия процент трябва да отразява цената на капитала и риска на проекта. Реалистично е да се предвиди дисконтов процент в рамките на 6-10 % (Matthews & Pearce, 2025). Частното финансиране изисква значително по-висока доходност, докато държавното финансиране може да бъде при по-ниска цена на капитала.

Предвид високата степен на неопределеност при бъдещите термоядрени електроцентрали за изготвянето на всеки прогнозен икономически модел особено важни ще са заложените стойности за капиталовите разходи, коефициентът на използване, продажната цена на електроенергията и дисконтовият процент. Прецизното и точно определяне на всички тези показатели към настоящия момент е изключително трудна задача тъй като все още няма изградена и търговски функционираща термоядрена електроцентрала.

За сравнение на очакваната икономическа конкурентоспособност на термоядрения синтез спрямо други технологии може да се използва показателят за изравнената цена на електроенергията, т.е. средната цена на произведения

мегаватчас (MWh) през целия живот на централата, включваща капиталови и оперативни разходи. Той позволява да се сравни термоядреният синтез с ядрената енергия, газта, въглищата, вятърната и слънчевата енергия (Lazard, 2025). Трябва обаче да се има предвид, че изравнената цена не отчита напълно системната стойност на различните технологии като например необходимостта от съхранение и балансиране при променливите възобновяеми енергиини източници. Сравнението чрез показателя изравнена цена на електроенергията при настоящите публикувани оценки (Lazard, 2025) показва, че термоядреният синтез все още има по-висока и значително по-несигурна себестойност от повечето вече използвани (доказали се) технологии. Въпреки това прогнозната изравнена цена на термоядрената енергия е сравнително близка до цената при новото ядрено строителство и до средната цена при офшорните вятърни централи. Сравнението показва, че при едно бъдещо комерсиализиране на технологията и успешно намаляване на капиталовите разходи, повишаване на коефициента на използване и намаляване на разходите за поддръжка, термоядреният синтез би могъл да достигне икономически конкурентни нива.

Основните финансови рискове на проектите за термоядрен синтез включват технологична несигурност, големи закъснения, надхвърляне на бюджета и колебания на глобалните пазари. Управлението на тези рискове изисква създаването на стабилни международни партньорства, ясно регламентирани публично-частни инвестиционни механизми и сериозна политическа подкрепа.

Регулаторните рамки оказват влияние върху времето за лицензиране, безопасността на експлоатация и общественото приемане, а спазването на международните договорености и стандарти за безопасност е изключително важно за осигуряване на инвестиционната сигурност.

Създаването, разработването, комерсиализирането и експлоатацията на термоядрените реактори ще доведе до намаляване на енергийната зависимост на отделните държави, стабилизиране на цените на електрическата енергия и стимулиране на икономическия растеж чрез индустриални високотехнологични обединения и развитие в технологии с висока добавена стойност.

3. Перспективи за бъдещо развитие на термоядрения синтез

В близко бъдеще, след успешното въвеждане в експлоатация и след комерсиализацията на термоядрените реактори, се очаква значително разширяване на пазара на технологии за термоядрен синтез както на национално, така и на международно ниво. Потенциалните приложения включват производство на електроенергия, водород, топлина за промишлеността и осигуряване на енергийна сигурност за отдалечени региони.

Енергията, произведена чрез термоядрен синтез, ще допринесе за намаляване на замърсяването на околната среда и за постигане на целите за нисковъглеродна икономика чрез намаляване на необходимостта от използването на изкопаеми горива в енергоемки икономически сектори като индустрията и транспорта.

3.1. Прогноза за развитието на пазара на електроенергия, произведена чрез термоядрен синтез

Към настоящия момент все още няма изградена действаща електроцентрала, базирана на термоядрен синтез. Най-важният международен проект е експерименталният реактор във Франция, който трябва да демонстрира

положителен енергиен баланс, но той не е предвиден за производство. През последните години все повече частни проекти за развитие на технологии за производство на енергия чрез термоядрен синтез успяват да привлекат финансиране и започва да се работи по тях.

Прогнозите за развитие на глобалния пазар на термоядрена енергия до 2050 година сочат потенциал за приходи между 50 – 70 млрд. евро годишно при успешна реализация на комерсиалните технологии (IEA, 2023). Тези цифри включват директни приходи от продажба на електрическа енергия, водород и топлинна енергия, както и индиректни ползи чрез технологични трансфери, индустриални обединения и научно-образователни програми.

Комерсиализацията на производството на енергия чрез термоядрен синтез несъмнено ще въздейства стимулиращо за създаването на индустриални обединения в страните, които инвестират и участват активно в разработката на реактори, системи за плазмено управление, суперпроводници и високотемпературни материали. Международните пазари също предоставят значителни възможности чрез партньорства, технологичен трансфер и глобални стандарти за безопасност. В таблица 3 е представена прогноза за развитието на пазара на електроенергия, произведена чрез термоядрен синтез.

Таблица 3
Прогноза за развитието на пазара на електроенергия, произведена чрез технологии за термоядрен синтез

Период	**Пазар на енергия от термоядрен синтез**	**Очакван дял на термоядрената енергия в глобалния енергиен микс**
2026 – 2035 г.	Пилотни проекти и екпериментални тестове	0 %
2036 – 2050 г.	Комерсиализация на технологиите	5 – 10 %
2051 – 2070 г.	Етап на растеж	11 – 30 %

Източник: Fusion Industry Association

Според проучване на компаниите за термоядрен синтез, направено от Асоциацията на индустрията за термоядрен синтез (FIA, 2025), прогнозното развитие на пазара на електоенергия, произведена чрез технологии за термоядрен синтез, може да се раздели на три основни етапа. През първия етап (2026 – 2035 г.) се очаква да се извършат множество екпериментални тестове и да се развиват нови пилотни проекти. Вторият етап (2036 – 2050 г.) ще бъде от съществена важност за бъдещето на термоядрения синтез, защото тогава се предвижда да се комерсиализират синтезните технологии и те неминуемо ще се сблъскат с конкуренцията на другите възобновяеми източници на енергия. Третият етап се очаква да започне след 2050 година и през него вече доказалите се и комерсиализирани технологии за термоядрен синтез все по-осезаемо ще започнат да навлизат на глобалния енергиен пазар.

Световното проучване на компаниите за термоядрен синтез се извършва ежегодно от Асоциацията на индустрията за термоядрен синтез от 2021 година.

В първото проучване участие вземат 23 компании, а през 2025 година в последното проучване участват 53 компании (29 от САЩ, 13 от Европа и 11 от Азия и Океания), работещи по проекти за енергия от термоядрен синтез, което показва нарастващия интерес на частните инвеститори към развитието на технологиите за производство на енергия чрез термоядрен синтез (FIA, 2025).

Финансовата привлекателност на проектите за термоядрен синтез зависи от стабилни дългосрочни инвестиции, политическата подкрепа, участие в търговията с въглеродни кредити (емисии) и възможностите за намаляване на първоначалните капиталови разходи чрез технологични иновации (NREL, 2024). Публично-частните партньорства и субсидиите за нововъведения и иновации могат значително да ускорят комерсиализацията и да повишат възвръщаемостта на инвестициите.

3.2. Предимства на термоядрения синтез спрямо другите енергийни технологии

В сравнение с традиционните изкопаеми горива, термоядреният синтез има следните предимства: практически неограничено количество гориво (деутерий и тритий), почти нулеви емисии на въглероден диоксид, непрекъснато производство без зависимост от климатичните условия и сравнително ниски експлоатационни разходи след първоначалната капиталова инвестиция.

Сравнението с други възобновяеми енергийни източници показва, че термоядреният синтез може да осигури базова (сигурна) енергия, която да компенсира сезонните и дневните колебания на тези източници. Сравнението с възобновяеми източници (като вятърна или слънчева енергия) показва, че термоядреният синтез предлага съществено предимство с непрекъснато производство и сравнително ниски оперативни разходи. В комбинация на термоядрения синтез със други възобновяеми източници на енергия може да се създаде стабилна електроенергийна система, която съществено намалява зависимостта и несигурността от променливи доставки или съществени и непредвидими колебания на цените на енергоресурсите.

В сравнение с процесите на ядрено делене[6] основните предимствата на термоядрения синтез са, че при него се отделят минимални количества дълготраен радиоактивен отпадък и термоядрените реактори ще могат да работят с много малки количества работно вещество. При тях липсва условието за критичност на масата на горивото, като по този начин категорично се отстранява опасността от взривно протичане на ядрената реакция, съответно се намалява рискът от ядрена авария и замърсяване на околната среда с радиация.

Заключение

Икономическата оценка на термоядрения синтез ясно показва, че той представлява възможност за стратегическа и дългосрочна инвестиция в бъдещето на глобалната енергетика. Въпреки високите първоначални капиталови разходи, технологията предлага редица предимства: сравнително ниски оперативни разходи, практически неограничен ресурс на гориво, минимални емисии на въглерод и висока стабилност на производството на електроенергия. Тези характеристики я правят потенциално конкурентна на

[6] Ядрено делене е процес, при който тежко атомно ядро се разделя на две или повече по-леки ядра, като се освобождават голямо количество енергия, неутрони и гама лъчение. Ядреното делене е принцип на работа в стандартните ядрени реактори в атомните електроцентрали.

други възобновяеми източници и на традиционните изкопаеми горива, особено когато се вземе предвид продължителният хоризонт на експлоатация на термоядрените реактори. От икономическа гледна точка, термоядреният синтез има потенциал да промени структурата на енергийния пазар. Чрез създаване на устойчиво и непрекъснато производство на електроенергия той може да намали ценовата нестабилност, свързана с колебанията на цената на изкопаемите горива, и да осигури сигурност на доставките на енергия на национално и международно ниво. Това е особено важно за държави като България, които са силно зависими от вноса на енергийни ресурси, където внедряването на термоядрени реактори би могло да намали енергийните разходи и значително да увеличи конкурентоспособността на икономиката.

Социално-икономическите ефекти от внедряването на технологии за термоядрен синтез също ще са значителни. Международни проекти като ITER (Франция), JET (Великобритания), Wendelstein 7-X (Германия) и NIF (САЩ) стимулират създаването на висококвалифицирани работни места, развитието на научни и инженерни центрове и формиране на високотехнологични клъстери. Това допринася за икономическото развитие на регионите, участващи в подобни проекти, и за международното сътрудничество в областта на научните изследвания и високите технологии. Също така комерсиализацията на термоядрения синтез ще създаде нови пазари за технологии с много висока добавена стойност, включително в иновативни области като суперпроводници, високотемпературни материали и оборудване за плазмено управление.

В заключение може да се обобщи, че термоядреният синтез не само предлага решение на енергийните и екологичните предизвикателства, но и представлява значим икономически двигател за иновации и индустриално развитие. Комерсиализацията на технологията за производство на енергия чрез термоядрен синтез има потенциал да трансформира глобалната енергийна система, като осигури устойчиво, стабилно и екологично чисто енергийно снабдяване. Това включва както директни икономически ползи – чрез възможно намаляване на енергийните разходи и създаване на нови работни места, така и стратегически ефекти като повишаване на националната енергийна сигурност и стимулиране на международното научно сътрудничество.

Използвани източници

1. Araiinejad, L., & Shirvan, K. (2025). Techno-economic analysis of deuterium-tritium magnetic confinement fusion power plants. Applied Energy, 401, 126567. [online] [Accessed: 21 September 2026]. Available at https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261925012978.
2. Chapman, R. (2025). Developing integrated cost models for fusion power plants. Journal of Fusion Energy, Article 43. [online] [Accessed: 20 September 2026]. Available at https://link.springer.com/article/10.1007/s10894-025-00515-1?utm_source=chatgpt.com.
3. Chen, F. F. (2016). Introduction to plasma physics and controlled fusion (3rd ed.). Springer International Publishing.
4. Dimitrov, G. (2022). Influence of the Covid-19 Pandemic on the Development of the Railway Transport in Bulgaria. Research Papers of UNWE, (5), 281-293. [online] [Accessed: 23 March 2026]. Available at https://doi.org/10.37075 /RP.2022.5.15.
5. FIA. (2025). The Global Fusion Industry in 2025. Fusion companies survey by the Fusion Industry Association (FIA). [online] [Accessed: 29 March 2026]. Available at

https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2025/07/2025-Global-Fusion-Industry-Report.pdf?utm_source=chatgpt.com.
6. IAEA. (2024). Plasma Physics and Technology Aspects of the Deuterium–Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy. IAEA-TECDOC-2049. Vienna, International Atomic Energy Agency, [online] [Accessed: 18 February 2026]. Available at: https://www.iaea.org/publications/15616/plasma-physics-and-technology-aspects-of-the-deuterium-tritium-fuel-cycle-for-fusion-energy.
7. IEA. (2023). Energy Technology Perspectives 2023. Paris, International Energy Agency. [online] [Accessed: 11 February 2026]. Available at: https://www.iea.org /reports/energy-technology-perspectives2023?utm_source =chatgpt.com.
8. ITER Organization. (2023). Energy for our future – ITER, Saint-Paul-lez-Durance, France. [online] [Accessed: 21 February 2026]. Available at https://www.iter.org/sites /default/files /media/2024-07/ibf_energy-for-future.pdf.
9. ITER Organization. (2025). Annual Report 2024. Saint-Paul-lez-Durance, France, 2025, [online] [Accessed: 15 March 2026]. Available at https://www.iter.org/sites /default /files/media/2025-11/exe-ra-2024-ok-web.pdf.
10. Kovachev, L., Iordanova, E., Yankov, G., & Angelov, I. (2025). Ultrashort laser-induced nuclear reactions: Initiating decay of helium nuclei and subsequent fusion reactions. ACS Omega, vol. 10 (3), pp. 2415–2420. [online] [Accessed: 24 March 2026]. Available at https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c10437?utm_source =chatgpt.com.
11. Lazard. (2025). Lazard's levelized cost of energy+ (LCOE+). [online] [Accessed: 23 September 2026]. https://www.lazard.com/media/uounhon4/lazards-lcoeplus-june-2025.pdf?utm_source=chatgpt.com.
12. Lindl, J. D. (1995). Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion. Physics of Plasmas, vol. 2 (11), pp. 3933–4024. [Accessed: 19 March 2026]. Available at https://doi.org/10.1063/1.871025.
13. LLNL. (2024). National Ignition Facility (NIF) – Annual Report 2024. Lawrence Livermore National Laboratory, [online] [Accessed: 29 March 2026]. Available at https://annual.llnl.gov/fy-2024.
14. Matthews, J., & Pearce, A. (2025). Economic study on the key aspects required for a commercial fusion power plant design based on EUROfusion-DEMO to become commercially viable. Fusion Engineering and Design, 217, 115105. [online] [Accessed: 19 September 2026]. Available at https://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S0920379625003023?utm_source=chatgpt.com.
15. NREL. (2024). Transforming Energy. Golden, CO, National Renewable Energy Laboratory – NREL, [online] [Accessed: 23 March 2026]. Available at https://www.nrel.gov/docs/gen /fy24/89904.pdf.
16. Rebut, P. H., Bickerton, R. J., & Keen, B. E. (1985). The Joint European Torus (JET): Installation, first results and prospects. Nuclear Fusion, 25(9), pp. 1011–1022.
17. Stacey, W. M. (2010). Fusion: An introduction to the physics and technology of magnetic confinement fusion. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH. [online] [Accessed: 25 February 2026]. Available at https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/natural-sciences/fusion-978-3-527-40967-9?utm_source=chatgpt.com.
18. Wesson, J. (2011). Tokamaks (4th ed.). Oxford University Press.
19. Whyte, D., Lo, A., Bielajew, R., Hancock, M., Moeykens, R., & Shaw, G. (2026). Criteria for the economic viability of fusion power plants. Journal of Fusion Energy, Article 49. [online] [Accessed: 21 September 2026]. Available at https://link.springer.com/article/10.1007/s10894-026-00577-9.

20. WNA. (2026). World Nuclear Performance Report 2025. London: World Nuclear Association. [online] [Accessed: 27 March 2026]. Available at https://world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/world-nuclear-performance-report.