SMALL MODULAR REACTORS

Malogulko J.,
Ph.D., Assistant Professor of electrical stations and systems department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.
Slidenko M.
student of group ES-21b, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

МАЛІ МОДУЛЬНІ РЕАКТОРИ

Малогулко Ю.В.
к.т.н., доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.
Сліденко М.О.
студент групи ЕС-21б, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.
https://doi.org/10.5281/zenodo.11640424

Abstract
This article examines the history, types of nuclear reactors, the current state of nuclear power in Ukraine, and the prospects for the introduction of small modular nuclear reactors (SMRs) in Ukraine from the point of view of energy independence and security. The role of nuclear generation in energy and the possibilities of MMR in the development of the energy system are highlighted. The report analyzes the global indicators of MMR development, their advantages and the possibility of solving the priority tasks of global energy policy. Several types of MMR were considered and the optimal one was chosen for their development in the modern realities of our country.

Анотація
У цій статті розглядаються історія виникнення, види ядерних реакторів, теперішній стан атомної енергетики в Україні та перспективи впровадження малих модульних ядерних реакторів (ММР) в Україні з точки зору енергетичної незалежності та безпеки. Висвітлено роль ядерної генерації в енергетиці та можливості ММР в розвитку енергетичної системи. Доповідь аналізує світові показники розвитку ММР, їх переваги та можливість вирішення пріоритетних завдань глобальної енергетичної політики. Розглянуто декілька різновидів ММР та обрано оптимальний для їх розвитку в сучасних реаліях нашої держави.

Keywords: SMR, reactor, nuclear power plant, NUWARD, SC-HTGR, Integral Molten Salt Reactor.
Ключові слова: ММР, реактор, АЕС, NUWARD, SC-HTGR, Integral Molten Salt Reactor.

Постановка проблеми. Атомна енергетика - це галузь енергетики, яка використовує ядерні реакції для виробництва електроенергії. Вона базується на принципі ядерного поділу або злиття, що відбувається у ядрах атомів. Під час ядерного поділу важких елементів, таких як уран або плутоній, атоми розщеплюються на менші атоми, що супроводжується великим виділенням енергії. Атомна енергетика використовує ці ядерні процеси для нагрівання води, перетворення її в пар і потім приведення пари в рух за допомогою турбін, що приводить генератор електроенергії. Перші експерименти з ядерним поділом були проведені в 1930-х роках відомими фізиками, такими як Енріко Фермі, Отто Ган, Лізе Мейтнер та Фрідріх Штрассман. У 1942 році Енріко Фермі та його команда досягли першої самопідтримуваної ядерної ланцюгової реакції в експериментальному реакторі під стадіоном Чиказького університету [1]. Згодом людство почало використовувати енергію, що вивільняється внаслідок поділу атомів для вироблення електроенергії, що мало досить вагомі переваги в порівнянні з вже наявними іншими типами електростанцій, наприклад, тепловими та гідроелектростанціями. Нині у світі експлуатується шість основних типів ядерних реакторів: важководний водо-водяний реактор, графіто-водний реактор, киплячий водо-водяний реактор, реактор із водою під тиском, реактор із газовим охолодженням та реактор-розмножувач на швидких нейтронах.

В Україні основним і наразі єдиним типом реактора, що використовується є важководний водо-водяний реактор. Зараз термін експлуатації більшості енергоблоків в Україні виходить у 2020-х - 2030-х роках, а вони виробляють близько 60% всієї електроенергії на рік. Звісно, зараз існує практика продовження терміну експлуатації наявних енергоблоків, але в довгостроковій перспективі це не є доцільним. Важливим аспектом існування та розвитку української атомної енергетики є заміна старих енергоблоків АЕС на нові та розгортання більших потужностей, що пов'язано зі збільшенням споживання електроенергії в Україні та світі загалом. Необхідність збільшення потужностей вироблення електроенергії зараз відчувають практично всі країни. Наймасштабніше будівництво ядерних енергоблоків здійснюється в Південно-Східній

Азії. Зокрема, у Китаї на етапі будівництва знаходиться 25 енергоблоків (в експлуатації – 13), ще 50 ядерних енергоблоків планувалося збудувати до 2050 року. В Індії в експлуатації знаходяться 22 енергоблоки, які виробляють 2,5% електроенергії в країні, а до 2050 року частку електроенергії, що виробляється на індійських АЕС, планується збільшити до 25%. Існує також потреба у зменшенні екологічного впливу роботи ТЕС та ТЕЦ [2].

Виклад основного матеріалу. Сьогодні розвиток атомної енергетики не стоїть на місці, розробляються нові технології і підходи, спрямовані на поліпшення безпеки, ефективності та створення нових типів атомних реакторів. Крім того, відбувається робота над реакторами на швидких нейтронах, які можуть мати значні переваги з точки зору використання ядерного палива та генерації енергії. Також вивчаються технології з використанням вторинних відходів ядерного палива, а також реакторів з високим температурним режимом, які можуть бути корисними для виробництва водню або для промислових процесів. Всі ці зусилля спрямовані на забезпечення ефективної та безпечної енергетичної системи, яка враховує сучасні вимоги до сталого розвитку та екологічної безпеки. Серед них варто відзначити розвиток малих модульних реакторів (ММР), які мають ряд значущих переваг, серед яких: компактніший дизайн, модульність, менші габарити, ефективність та інше.

Малі модульні реактори – не нова, але новітня технологія. Реактори малої потужності мають свою історію, яка бере свій початок ще з 40-х років минулого сторіччя. Основна ідея їхнього створення виникла в результаті досліджень та розробок, ініційованих Військово-повітряними силами США, армією та флотом. Найбільш подібний до ММР був реактор, розроблений американською армією в рамках воєнної ядерно-енергетичної програми. Тоді було збудовано вісім реакторів малої потужності. Усі вони розміщувались на однакових по характеристиках майданчиках, які на сьогодні також вважаються перспективними для спорудження ММР [3].

Малі модульні реактори (ММР) є новим напрямком в атомній енергетиці, який в основному відрізняється від традиційних великих реакторів за рядом параметрів. ММР мають значно менші розміри порівняно з традиційними ядерними реакторами на сучасних АЕС. Це дозволяє їх встановлювати на обмеженому просторі, такому як міські райони або у важкодоступній місцевості, куди важко прокладати ЛЕП від ОЕС або втрати при передачі є досить великими і забезпечення таких віддалених регіонів не є доцільним з економічної точки зору. Вони можуть бути інтегровані в існуючі енергетичні мережі, забезпечуючи стабільність та гнучкість енергопостачання. Зазвичай ММР складаються з набору невеликих модулів, які виготовляються заводським шляхом та транспортуються до місця встановлення. Цей підхід спрощує процес будівництва та розширення енергетичних систем, оскільки модулі можуть бути виготовлені в контрольованих умовах заводу, що дозволяє зменшити час і складність будівництва на місці. Крім того, така модульна конструкція дозволяє легко масштабувати енергетичні потужності, додавши або забираючи модулі за потреби. Велика частина ММР розробляється за допомогою стандартизованих компонентів та процесів виробництва, що спрощує їх виробництво та експлуатацію. Ця стандартизація дозволяє виробникам зосередитися на покращенні технічних характеристик та зниженні витрат, використовуючи вже перевірені рішення. Крім того, стандартизація дозволяє легко адаптувати та модернізувати ММР в майбутньому, оскільки компоненти можуть бути замінені або оновлені без значного переоснащення системи в цілому. Такий підхід також сприяє швидкому впровадженню нових технологій та підвищує надійність та ефективність ММР. Більшість ММР використовують передові технології, спрямовані на забезпечення високого рівня безпеки. Наприклад, деякі ММР використовують пасивні системи охолодження, які автоматично активуються у випадку аварії. Ці системи базуються на природних фізичних принципах, таких як конвекція або термосифонний ефект, і не потребують активного втручання операторів або електропостачання для ефективного охолодження реактора. Такий підхід підвищує надійність системи і зменшує ризик аварійних ситуацій. Крім того, передові системи моніторингу та управління дозволяють операторам ефективно контролювати термоядерні реакції в реакторі та вчасно реагувати на будь-які небезпечні ситуації [4]. Звісно, безпека є головним фактором роботи таких об’єктів. Вона є найвищим пріоритетом в Україні і тільки після підтвердження безпечності технології розглядаються усі інші фактори, зокрема й економічний. Малі модульні реактори є більш безпечними, у тому числі, за рахунок пасивних систем безпеки. Це означає, що навіть у разі ядерної зими, коли людина не зможе бути присутньою на блочному щиті управління реактором, не матиме змоги здійснювати нагляд та контроль за станом енергоблока, системи безпеки самостійно, без участі людини, переведуть реактор у безпечний стан. Подібні системи безпеки знижують ризики виникнення важких ядерних аварій.[3] Як правило, ММР мають також і більші терміни експлуатації, що робить їх доволі привабливими з економічної точки зору. Хоча і вартість будівництва ММР на одиницю потужності зараз є вищою, ніж наявних зараз атомних енергоблоків, термін експлуатації дещо зменшує вплив економічного фактору, фактично це може призвести до зниження загальних витрат на довгострокову перспективу, оскільки ефективне та надійне функціонування реакторів протягом тривалого періоду часу сприяє оптимізації витрат та забезпечує стабільність енергопостачання. Зараз основною ідеєю, яку можливо реалізувати в повній мірі – це заміна сучасних ТЕС на електростанції, що складатимуться з ММР. Майданчики ТЕС вже мають низку готових рішень для переобладнання їх для спорудження малих модульних реакторів. Зокрема, це наявність розподільчого обладнання, власне земельна ділянка з відповідним цільовим

призначенням, доступ до водойм та систем зберігання води, які необхідні для охолодження, а також залізничного та автомобільного зв'язків, які дозволять зберегти логістичні ланцюги поставок палива. Також на ТЕС є низка інших систем та будівель, які можна перепрофілювати. Це системи стисненого повітря, хімічні склади, система зберігання технічних газів, системи очищення стічних вод, мобільне підйомне обладнання, адміністративні будівлі тощо. Крім того, на ТЕС вже є кваліфіковані кадри. Звісно ж, їх потрібно буде довчити. Але збереження людського потенціалу та робочих місць відіграє важливу суспільну роль, зменшить соціальну напругу у регіоні та підтримуватиме розвиток громад. Тож переобладнання майданчиків ТЕС для спорудження ММР дозволить скоротити капіталовкладення та знизить вартість проекту будівництва атомних електростанцій [5]. Варто зазначити, що в найближчому майбутньому буде також реальною заміна атомних електростанцій (АЕС) на малі модульні реактори (ММР), оскільки ММР мають потенціал стати більш безпечними, ефективними та економічно вигідними джерелами енергії. По-перше, ММР можуть бути розміщені ближче до споживачів енергії, що дозволяє уникнути втрат енергії під час транспортування. По-друге, вони можуть бути легше відключені в разі необхідності обслуговування чи ремонту, що забезпечує більшу гнучкість енергосистеми. Фактично, в сучасних реаліях для заміни палива чи виникнення аварійної ситуації на АЕС потрібно виводити досить велику потужність генерування електростанції, що може призводити до небалансу або необхідності використання потужностей інших типів електростанцій, а при використанні ММР таких ситуації можливо уникнути, через виведення лише незначної потужності одного чи декількох реакторів. Тому очевидними є переваги будівництва таких електростанцій. Але важливо будувати заводи з виробництва ММР саме в Україні, що містить багато позитивних факторів, таких як: розвиток високотехнологічної промисловості, залучення інвестицій, підвищення конкурентоспроможності, створення робочих місць, енергетична незалежність, підвищення статусу технологічної країни та ряд інших. "Впровадження новітніх технологій і зведення сучасних виробничих потужностей Holtec в Україні матиме колосальне значення для повоєнної відбудови економіки нашої країни. Це дасть створити тисячі нових робочих місць і значно посилить конкурентоспроможність української атомної промисловості. Маємо шанс стати лідерами у цій сфері поряд з іншими світовими компаніями", – наголосив Петро Котін. "Енергоатом" планує реалізувати важливий проєкт із будівництва в Україні заводу, на якому виготовлятиметься основне обладнання для малих модульних реакторів за технологією Holtec SMR, включно з корпусом реактора [6].

NUWARD - ФРАНЦІЯ

NUWARD розробляється як NUWARD розробляється як атомна електростанція з реактором типу SMR покоління III+ загальною чистою потужністю 340 МВт з двома незалежними реакторними модулями для забезпечення гнучкої експлуатації. Це інтегрований реактор типу PWR з основними компонентами системи ядерного паропостачання (NSSS), включаючи механізм приводу регулюючого стрижня, парогенератор і турбокомпресор, повністю інтегровані в корпусі реактора (RPV). Укорочений корпус реактора розміщений у сталевому захисному корпусі, розміщеному під землю на рівні підземного сховища, а його невеликі розміри дозволяють більш ефективно виготовляти цей модуль та встановлювати на місці. Спеціальна конструкція NUWARD включає в себе систему пасивної безпеки для всіх основних систем, яка не потребує зовнішнього втручання. Вона включає контроль умов і є незалежною завдяки внутрішньому кінцевому тепловідводу для періодів зберігання понад три дні. Конструкція реактора забезпечує легку інтеграцію в будь-яку електричну мережу, як заміну електростанції на викопному паливі або як доповнення до потужностей на відновлюваних джерелах енергії. NUWARD пропонує потужності з базовим або маневреним навантаженням. Для врахування сезонних коливань, концепція набору реакторів на одній станції надає оператору ряд рішень для адаптації графіка технічного обслуговування з пріоритетом на потреби енергопостачання. Принаймні один реактор станції завжди працює і постачає електроенергію в мережу, в той час як інший може перебувати у відключенні.

NUWARD реалізує спрощення конструкції за рахунок поєднання системи первинного охолодження реактора і підвищеної безпеки за допомогою систем пасивної безпеки. Реактор NUWARD - це повністю окремий реактор типу PWR, що містить в одному унікальному корпусі всі основні компоненти системи охолодження реактора, включаючи парогенератори, компенсатор тиску і механізми приводу регулюючих стрижнів (CRDM). Активна зона базується на стандартних паливних збірках 17x17, що використовуються в діючих PWR, з укороченою висотою активної зони і стрижнями UO_2 (збагачення < 5% U_{235}). Завдяки безборній конструкції використовуються різні збагачення U_{235}. Тповий інтервал заправки становить 24 місяці.

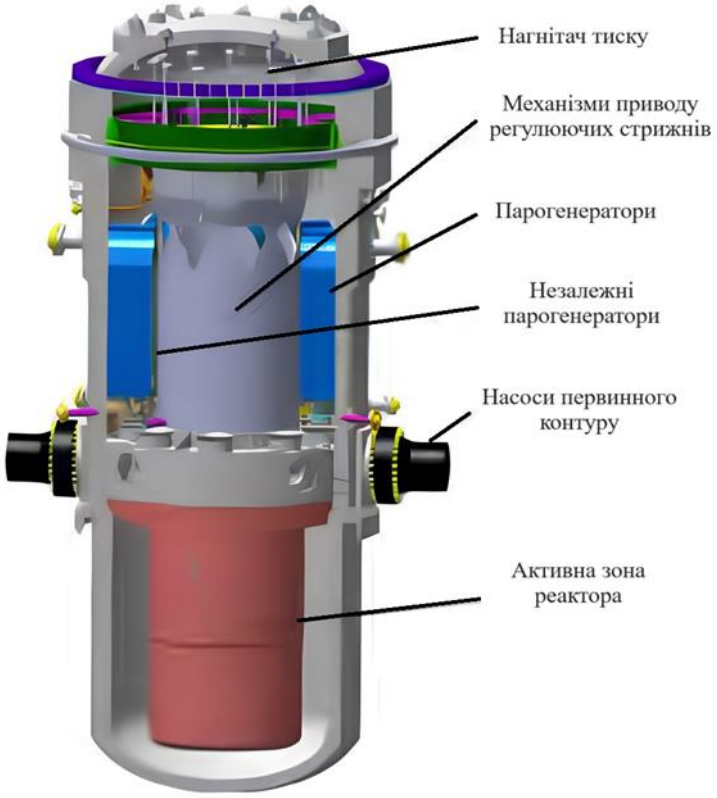

Рисунок 1 – Головні особливості конструкції NUWARD

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Регулювання проведення ядерної реакції здійснюється за допомогою регулюючих стрижнів і твердих поглиначів нейтронів, що дозволяє спростити проектування і експлуатацію допоміжних систем як в нормальних, так і в аварійних ситуаціях, а також скоротити викиди в атмосферу при експлуатації.

Система охолодження реактора NUWARD заснована на використанні інноваційної технології роботи парогенератора, що походить від різновиду пластинчастого теплообмінника, для якої були створені спеціальні конструкції враховуючи різновиди виробничого процесу, що дозволяють застосовувати її в ядерній енергетиці. Ця технологія поєднує парогенератор з прямим підключенням до реактора. Таким чином, загальний розмір, а особливо висота системи охолодження реактора значно зменшується. Система містить шість компактних парогенераторів.

У корпусі реактора NUWARD інтегрований реактор під тиском. Великий об'єм нагнітача тиску забезпечує запас міцності для експлуатаційних перехідних процесів, а також для нормальної роботи реактора. Шість насосів з герметичним корпусом змонтовані горизонтально на корпусі реактора, розташовані під теплообмінниками у нижній частині корпусу для забезпечення ефективних гідравлічних умов.

Реактор NUWARD і пов'язані з ним системи безпеки призначені для:

- Пасивного управління всіма можливими ситуаціями без необхідності втручання оператора, будь-якого зовнішнього джерела кінцевого тепловідведення, без будь-якого зовнішнього електропостачання (нормального та аварійного) більше 3 днів.

- Активне управління аварійними ситуаціями, з простою діагностикою та впровадженням диверсифікованих систем.

- Пасивне управління аварійними ситуаціями з утриманням палива в корпусі реактора.

Підхід до безпеки для NUWARD кращий з наступних невід'ємних особливостей конструкції, які забезпечують і підтримують безпечний стан системи, що вимагає мінімального втручання з боку експлуатаційної команди:

- Великий запас теплоносія в реакторі в кг/МВт(т), що забезпечує інерційність у порівнянні з перехідними процесами потужності.

- Внутрішні системи безпеки запобігають аваріям, пов'язаним з викидом палива з стрижнів.

- Металевий захисний корпус забезпечує пасивне охолодження протягом декількох днів.

- Невелика активна зона у великому корпусі, що забезпечує утримання в корпусі палива під час виникнення можливих аварійних ситуацій.

Таблиця 1

Основні технічні показники NUWARD

Технічні показники	
Тип реактора	iPWR (цілісний водо-водяний ядерний реактор)
Теплоносій/сповільнювач	Легка вода / Легка вода
Номінальна потужність (теплова/електрична)	2x540 МВт / 2x170 МВт
Тип циркуляції теплоносія	Примусова циркуляція
Тиск первинного контуру	15 МПа
Температура теплоносія на вході / виході	280 / 307 °C
Тип палива/тип ТВЕЛ	UO_2 / Квадратне розташування 17x17
Максимальний відсоток збагачення палива	менше 5%
Кількість ТВЗ	76
Тривалість циклу однієї заправки паливом (в місяцях)	24
Використання встановленої потужності	95%
Метод керування зміною потужності	механізм руху регулюючих стрижнів зі сповільнювачем
Система безпеки	пасивна
Термін експлуатації (в роках)	60
Площа станції	3500 м^2
Висота/діаметр реактора	13/4 м
Вага	310 метро-тон
Сейсмічне планування	0,25g
Особливості	Висококомпактна система безпеки і захисна водяна оболонка, безборна конструкція, висока гнучкість системи

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Що стосується відведення тепла від активної зони реактора: NUWARD включає в себе 2 потоки пасивної системи відведення тепла, які передають шляхом природної циркуляції тепло від активної зони до водяної оболонки, що оточує реактор, через два безпечних компактних парогенератора та 6 незалежних від звичайних парогенераторів. Кожна пара приводиться в дію за допомогою 2 диверсифікованих каналів. Водяна оболонка, що оточує реактор, забезпечує функцію відведення тепла протягом більш ніж 3 діб без необхідності зовнішнього кінцевого тепловідводу. Мінімальний розмір і ефективна пасивна система відведення тепла призводять до мінімізації втрат теплоносія під час роботи. Комплект з 2 резервних насосів низького тиску забезпечує поповнення запасу води для охолодження реактора в разі аварійних ситуацій.

Що стосується контролю за станом роботи: NUWARD включає в себе функції безпеки для запобігання ризиків різних рівнів. Активна зона не знаходиться в аварійному стані з водою при 20°C, навіть якщо найефективніший сповільнювач застряг у верхньому положенні. Ця опція запобігає виникненню аварій, навіть у найважчих умовах роботи.

Майданчик станції містить 2 незалежні модулі і пов'язаний з ними басейн збереження палива. Жодна система чи ресурс за межами не потрібні для забезпечення безпечного стану реактора протягом щонайменше 3 днів. Станція може існувати незалежно принаймні на цей період завдяки використанню водяної оболонки, в яку занурюється кожен реактор. Що стосується вимог до майданчика під час будівництва, то установки NUWARD підходять для морських та річкових майданчиків з відкритим контуром традиційного конденсаторного охолодження.

NUWARD також розроблений для задоволення вимог мережевих потреб: базовим мережевим характеристикам ENTSO-E та EUR (зазвичай 225 кВ/400 кВ і 50 Гц). Можлива адаптація до конкретних вимог користувача, наприклад, 60 Гц. План станції забезпечує можливість зберігання відпрацьованої тепловиділяючої збірки протягом 10 років після експлуатації. Також може бути варіант 20-річного зберігання.

SC-HTGR – США

SC-HTGR - це модульний високотемпературний реактор з графітовим уповільнювачем і гелієвим охолодженням з номінальною тепловою потужністю 625 МВт(т) і номінальною електричною потужністю 272 МВт(е). Він виробляє високотемпературну пару, придатну для різноманітного використання, включаючи виробництво тепла для промислових процесів і високоефективне виробництво електроенергії. Рівень безпеки SC-HTGR дозволяє розміщувати його поряд з промисловими об'єктами, які використовують високотемпературну пару. Це може відкрити новий великий шлях для використання ядерної енергії. Модульна конструкція дозволяє підібрати розмір установки для різних необхідних умов застосування. Концепція SC-HTGR ґрунтується на минулому досвіді в реалізації проектів HTGR, а також на досягненнях в розробці і проектуванні модульних HTGR, які мали місце в останні роки. Загальна конфігурація в повній мірі використовує переваги роботи, виконаної над ранніми модульними концепціями HTGR.

Структура парового циклу HTGR є надзвичайно гнучкою. Оскільки пара високого тиску є одним з найбільш універсальних теплоносіїв, одна базова конструкція реакторного модуля призначена для виробництва високотемпературної пари. Паровий цикл також добре підходить для когенерації електроенергії та технологічного тепла.

Температура на вході та виході з реактора становить 325°C та 750°C відповідно. Ці температури були обрані в першу чергу для підтримки бажаних умов виходу пари для цільових потреб. Ці температури також дозволяють використовувати SA-508/533, стандартний матеріал корпусу реактора PWR, для корпусів першої системи, не вимагаючи обшивки, окремого охолодження або спеціального теплового захисту. Для типової чотиримодульної концептуальної станції з паровим циклом рівень потужності одного реакторного модуля становить 625 МВт(т).

Паливна частинка з покриттям TRISO складається з паливного ядра з оксикарбіду урану (UCO), оточеного декількома шарами керамічного покриття, які забезпечують первинний бар'єр для утримання продукту поділу за всіх проектних умов аварії. Загальний запас палива включає приблизно 10 мільярдів таких частинок на кожну активну зону. Частинки розподілені в графітових циліндричних пеналах. Декілька упаковок містяться в шестигранних паливних блоках з графіту ядерної міцності. Контейнери укладаються в паливні отвори, зроблені в блоках.

На зразковій установці паливні блоки сконфігуровані в кільцеву активну зону з 102 колон, яка оточена графітовими тепловиділяючими елементами. Внутрішній або центральний тепловиділяючий елемент також містить графітові розсіювачі. Таким чином, основна структура активної зони повністю керамічна. Така конфігурація максимізує здатність реактора до пасивного відведення тепла. Активна зона має висоту 10 блоків. Еталонна конструкція реакторного модуля може бути масштабована з 625 МВт(т) до 16 МВт(т) на модуль, використовуючи ті ж самі паливні блоки в зміненому розташуванні.

Тривалість робочого циклу активної зони для еталонного реактора SC-HTGR становить від 420 до 540 ефективних днів на повну потужність. Це було отримано для первинної активної зони з використанням початкового завантаження активної зони частинками, збагаченими по U235 до 10,36%, з часткою заповнення 0,289 для всіх паливних елементів в активній зоні, а також для перезавантажень з використанням заміни половини активної зони паливними блоками, збагаченими по U235 до 15,5 %, з часткою заповнення 0,279.

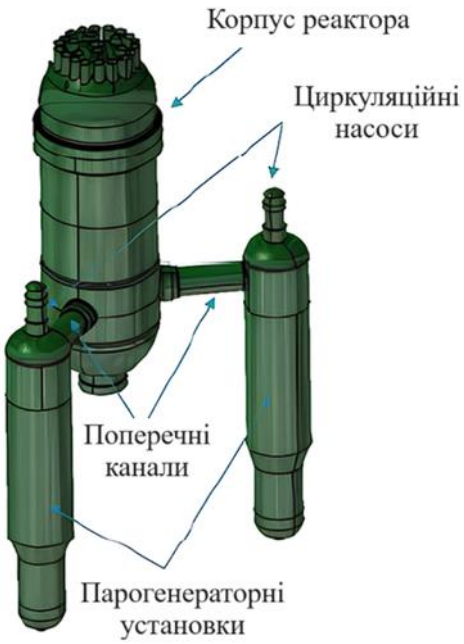

Рисунок 2 – Загальний вигляд реактора SC-HTGR

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Контроль локальних піків потужності тепловиділення і обмеження результуючих пікових температур палива в критичні моменти часу в паливному блоці буде здійснюватися шляхом завантаження окремих поглиначів, що вигорають, зміни частки пакування палива і зміни збагачення паливних частинок.

Це дозволяє оптимізувати розподіл потужності активної зони в трьох основних параметрах, а також може бути використано для підтримки ефективного використання палива, стійкості до радіоактивного розповсюдження і зменшення кількості радіоактивних відходів.

Значний від'ємний температурний коефіцієнт модульного реактора SC-HTGR разом з його вели-

кими тепловими запасами забезпечують можливість зупинки реактора у випадку, якщо не вдасться вивести його з реактора з-під контролю. Гравітаційні, різноманітні та активні системи контролю чутливості надають додаткову впевненість у здатності зупинити реактор.

Завантаження палива виконується за допомогою роботизованих систем з непорушною межею теплоносія першого контуру. Після зупинки реактора температура первинного теплоносія швидко знижується, а запаси гелію зменшуються до рівня, близького до атмосферного. Доступ для завантаження гелію здійснюється через отвори для приводу стрижнів управління у верхній частині корпусу реактора. Потім починається роботизована операція заправки з використанням заздалегідь визначених послідовностей переміщення палива і блоку відбивачів.

Корпус реактора є частиною системи корпусів, яка є основним елементом, що утримує тиск, а також включає в себе проміжні корпуси і корпуси парогенераторів. У корпусі реактора встановлені активна зона реактора, елементи відбивача, опорна конструкція активної зони і пристрої, що утримують її. Компоненти активної зони реактора разом з елементами внутрішніх компонентів реактора утворюють графітову збірку, яка спирається на графітові опорні стійки і утримується металевою опорною збіркою. Внутрішні компоненти реактора складаються з верхніх утримуючих елементів, постійних графітових бічних елементів відбивачів, графітових опорних елементів, металевих опорних елементів і верхнього захисного екрану.

Таблиця 2

Основні технічні показники SC-HTGR

Технічні показники	
Тип реактора	HTGR (блочний високотемпературний газоохолоджуваний реактор)
Теплоносій/сповільнювач	Гелій/графіт
Номінальна потужність (теплова/електрична)	625 МВт / 272 МВт
Тип циркуляції теплоносія	Примусова циркуляція
Тиск первинного/вторинного контурів	6 МПа / 15 МПа
Температура теплоносія на вході / виході	325 / 750 °C
Тип палива/тип ТВЕЛ	Тверде паливо UCO TRISO в гексагональних графітових блоках
Максимальний відсоток збагачення палива	14,5% в середньому / 18,5% макисмум
Кількість ТВЗ	Кільцевий стрижень, 102 колона, 10 блоків / колона
Тривалість циклу однієї заправки паливом (в місяцях)	Заміна ½ активної зони кожні 18 місяців; 21 день перерви в роботі
Використання встановленої потужності	95%
Метод керування зміною потужності	Регулюючі стрижні (гравітаційна вставка) Незалежна резервна система відключення (гравітаційна вставка) Великий від'ємний температурний коефіцієнт
Система безпеки	активна / пасивна
Термін експлуатації (в роках)	80
Площа станції	10000 м^2
Висота/діаметр реактора	24/8,5 м
Вага	880 метро-тон
Сейсмічне планування	0,5g
Вимоги до паливного циклу / Підхід	Однократний паливний цикл / варіанти для подальшого розгляду
Особливості	Паливо з покриттям з частинок; пасивне відведення тепла розпаду; пасивна безпека; високотемпературна технологічна пара; нульова зона аварійного планування; підземне будівництво.

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Основна мета безпеки конструкції реактора SC-HTGR - обмежити дозу від аварійних викидів лише в декількох сотнях метрів від реактора. Для досягнення цієї мети безпеки в конструкції використовуються високотемпературні частинки палива з покриттям TRISO, графітового сповільнювача і гелієвого теплоносія, а також пасивний тепловідвід активної зони з низькою питомою потужністю і неізольованого сталевого корпусу реактора. Первинний бар'єр утримання радіонуклідів в реакторі SC-

HTGR складається з трьох шарів керамічного покриття, що оточують активну зону і утворюють механізм утримання радіонуклідів у частинках палива з покриттям. Система покриттів являє собою мікромасштабну посудину під тиском навколо кожного елементу, яка була спроектована таким чином, щоб витримувати надзвичайно високі температури, не втрачаючи здатності утримувати продукти поділу навіть в умовах аварії.

Високотемпературні характеристики графітових структурних компонентів активної зони реактора доповнюють високотемпературні характеристики палива. Висока теплоємність і низька питома потужність активної зони призводять до дуже повільних і передбачуваних температурних переходів навіть без активного охолодження. Гелій, теплоносій реактора і контур теплопередачі, є хімічно інертним і нейтронно прозорим. SC-HTGR спроектований для пасивного відведення тепла розпаду від активної зони незалежно від того, чи присутній первинний теплоносій, чи ні. Бетонні стіни, що оточують корпус реактора, покриті панелями системи охолодження реактора, які забезпечують природне циркуляційне охолодження як під час нормальної експлуатації, так і під час аварій, тому немає потреби в активації системи, зміні режимів або конфігурації в разі аварії.

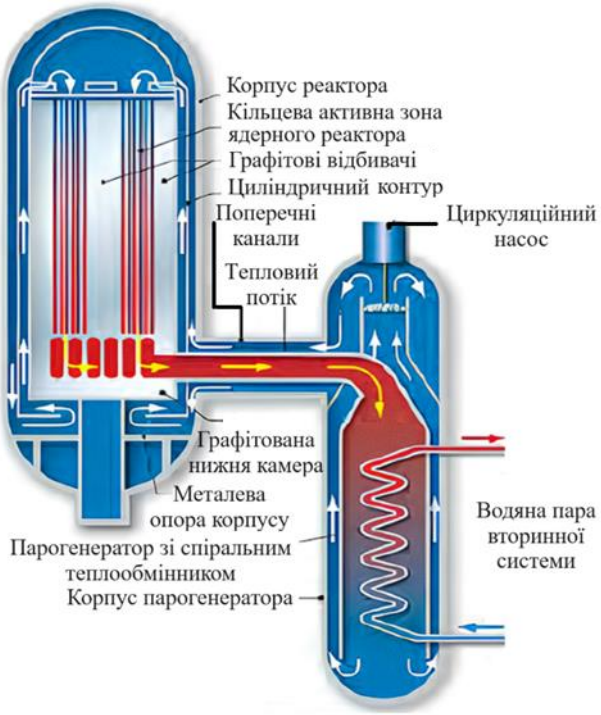

Рисунок 3 – Основні складові реактора SC-HTGR

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Для реагування на будь-який з аварійних сценаріїв, які були сформульовані для різних модульних концепцій HTGR, включаючи SC-HTGR, протягом всієї історії ліцензування модульних HTGR, не потрібні ні системи безпеки, що живляться від мережі, ні дії оператора.

SC-HTGR має три системи відведення тепла. Два основних контури охолодження передають тепло у вторинний контур під час нормальної роботи. Коли виконується технічне обслуговування основних контурів охолодження, доступна окрема система охолодження. Ця система використовує окремий і незалежний циркуляційний насос і теплообмінник, розташований в основі корпусу реактора. Ці системи також забезпечують охолодження під час дозавантаження палива і нормальних умов зупинки, а також під час більшості очікуваних подій і аварійних викидів. Якщо дві вищезгадані активні системи не працюють, можна використовувати пасивне відведення тепла.

Тепло від активної зони передається радіально через графітові відбивачі до активної зони і, зрештою, до корпусу реактора. З корпусу тепло передається до системи охолодження активної зони реактора (СОЗР) за допомогою теплового випромінювання і природної конвекції. Цей шлях відведення тепла залишається ефективним, навіть якщо весь первинний теплоносій вичерпано.

Зображена вище система охолодження активної зони реактора - це резервна система водяного охолодження з природною циркуляцією, яка підтримує прийнятні температури бетону в ділянці реактора під час нормальної експлуатації, а також прийнятні температури палива, корпусу і бетону під час можливих аварій.

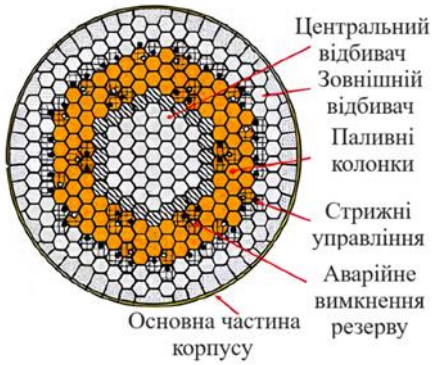

Рисунок 4 – Паливні комірки (вигляд зверху)

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Кожен незалежний контур системи охолодження, що пов'язаний з безпекою, складається з тепловидільних панелей в порожнині, що оточує корпус реактора, з'єднаних контуром природної циркуляції з баком-накопичувачем води. Цей контур використовує природну циркуляцію для всіх умов експлуатації та аварійних ситуацій. Окремий активний контур, не пов'язаний з безпекою, охолоджує бак під час нормальної експлуатації. Вода в баку забезпечує необхідну теплову потужність для щонайменше 7 днів безперервного охолодження під час аварій, коли активна система безпеки та відведення тепла може бути недоступною.

Функцію утримання радіонуклідів у реакторі SC-HTGR виконують, в першу чергу, паливні покриття TRISO. Графітові конструкції активної зони, границя першого контуру теплоносія і будівля реактора забезпечують додаткову функцію утримання. Будівля реактора SC-HTGR піддається викиду в атмосферу під час аварії, пов'язаної з розгерметизацією першої системи 182. Будівля забезпечує додаткове утримання продуктів поділу у випадку аварії. Проте, будівля, що утримує тиск, така як будівля захисного контуру легководного реактора, не є необхідною або технічно доцільною через відмінні характеристики утримання продуктів поділу палива навіть за екстремальних сценаріїв аварії.

Номінальна продуктивність виробництва електроенергії системи SC-HTGR була оцінена з урахуванням попередніх оцінок ефективності гелієвих циркуляційних систем, насосів живильної води, турбіни, генератора та інших електричних навантажень станції. Чиста електрична потужність кожного реакторного модуля тепловою потужністю 625 МВт(т) становить 272 МВт(е), а чистий ККД - 43,5%. На додаток до номінальної продуктивності станції, продуктивність SC-HTGR вже була оцінена для спекотних посушливих місцевостей, де, як передбачалося, потрібне сухе охолодження. Результати цієї оцінки показують, що можна досягти чистого виробництва електроенергії на рівні 239 МВт(е) з відповідним ККД 38,2%.

Контрольно-вимірювальні прилади SC-HTGR включають в себе прилади, що використовуються для захисту, моніторингу та управління установкою. Метою проектування станції є використання комерційно перевіреного обладнання та програмного забезпечення для контролю та управління з продемонстрованою надійністю.

Кожен модуль розташований в окремій будівлі. У стандартній конструкції використовується повністю підземне розташування реакторної будівлі. Це забезпечує переваги конструктивного виконання і кращий захист від зовнішніх небезпек. Альтернативна частково підземна конструкція може бути використана на майданчиках, де повністю підземна є недоцільною. Основними функціями реакторної будівлі є підтримка компонентів першого контуру і захист системи від зовнішніх впливів.

Висока теплова ефективність і високе вигоряння палива в реакторі SC-HTGR підтримують сталість поточних наскрізних паливних циклів за рахунок мінімізації об'єму відпрацьованого палива. Однократний паливний цикл на UCO потребує близько 6,8 ММТР/ГВт(е)-рік, що еквівалентно використанню природної уранової сировини близько 224 МТ/ГВт(е)-рік. Конструкція активної зони реактора SCHTGR також сумісна з різними більш досконалими паливними циклами, що використовують перетворення і переробку плутонію та урану, в тому числі з Th/U, Th/Pu, Pu і паливними формами уранової руди та актинідів. Паливо з покриттям TRISO також може бути перероблене, коли і якщо такий процес є обов'язковим і економічно вигідним.

Завдяки вищій тепловій ефективності вимоги до зберігання та захоронення, які значною мірою залежать від рівня розпаду продуктів поділу, будуть меншими приблизно на 50% для HTGR у порівнянні з LWR. Термін зберігання відпрацьованого палива становить 10 років. Частинки з покриттям демонструють відмінні характеристики обмеження радіоактивності при довгостроковому зберіганні або захороненні, зменшення об'єму і переробка також є варіантами, що досліджувались в минулому.

IMSR – КАНАДА

Вбудований реактор на розплавленій солі (IMSR) - це невеликий модульний реактор на розплавленій солі тепловою потужністю 440 мегават (IMSR400), що працює на розплавленій солі. IMSR - це цілісна конструкція ядерного реактора. Він має повністю герметичний корпус реактора з вмонтованими насосами, теплообмінниками і стрижнями

зупинки, які змонтовані всередині одного корпусу - активної зони реактора IMSR. Герметична активна зона повністю замінюється в кінці терміну експлуатації (номінально 7 років). Це дозволяє досягти заводського рівня контролю якості та економії, уникаючи при цьому необхідності відкривати та обслуговувати корпус реактора на майданчику електростанції. IMSR400 досягає найвищого рівня внутрішньої безпеки, оскільки не залежить від втручання оператора, механічних компонентів, що приводяться в дію, подачі теплоносія або їхніх допоміжних систем, таких як електропостачання або інструментальне повітря, при вирішенні проблем, пов'язаних з аварійними ситуаціями.

Установка IMSR призначена для різних типів навантаження, від базового до змінного. Завдяки використанню простого, модульного і замінного блоку основної частини досягаються високі показники надійності. IMSR була спеціально розроблена для заводського виготовлення. Ядерні компоненти мають невеликі розміри і легко транспортуються. Активна зона IMSR розрахована на короткий термін служби, що дозволяє на спеціальних заводських лініях виробляти їх в напівавтоматичному режимі, як, наприклад, лінії з виробництва авіаційних реактивних двигунів. В основі технології розплавленої солі, що лежить в основі конструкції IMSR, лежить технологія реактора з розплавленою сіллю, яка була результатом послідовних і масштабних дослідницьких програм в Національній лабораторії Оук-Ридж в 1950-х, 1960-х і 1970-х роках. В основі реактора використано 244 різних матеріалів, обладнання та компонентів реактора. Дослідним проривом стало будівництво і успішна експлуатація невеликого (менше 10 МВт(т)) експериментального тестового реактора на розплавленій солі. В IMSR використовується розплавлена фторидна паливна сіль, яка також слугує первинним теплоносієм, що циркулює між активною зоною з твердим графітовим сповільнювачем і первинними теплообмінниками. Проте, IMSR, хоча і базується на перевіреній технології розплавленої солі MSRE, використовує унікальну " цільну" конструкцію реакторної установки, в якій всі первинні насоси і первинні теплообмінники інтегровані в герметичний і замінний корпус реактора. Це ключове нововведення разом з іншими запатентованими інноваціями забезпечує реактору високу комерційну і промислову цінність - високу надійність і експлуатаційну корисність - на відміну від невеликого тестового реактора лабораторного масштабу.

Рисунок 5 – Вигляд реактора Integral Molten Salt Reactor в розрізі

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Активна зона виготовляється в заводських умовах, а потім доставляється на майданчик реакторної установки, де після остаточного складання опускається в захисну оболонку, розташовану в підземному бункері реактора. Сіль первинного палива IMSR - це термічно стабільна рідина з відмінними властивостями теплопередачі теплоносія і високими власними властивостями утримання радіонуклідів. Контур вторинного соляного теплоносія, також фтористої солі (але без палива), передає тепло від паливної солі активної зони через первинні теплообмінники до третього промислового соляного контуру з сонячною енергією.

Контур з соляного розчину, який перекачується з атомного енергоблоку в окрему будівлю, живить або парогенератор, або використовується для виробництва пару, для виробництва електроенергії, або використовується для інших технологічних потреб. Паровий контур живить звичайну промислову парову турбіну для виробництва електроенергії та/або промислового виробництва пари, в залежності від необхідного застосування. Як варіант, частина або вся гаряча розплавлена сонячна сіль може бути спрямована безпосередньо на процес теплопостачання.

Контроль за рівнем реактивності забезпечується за рахунок від'ємного температурного зворотного зв'язку, який стає можливим завдяки нейтронній поведінці розплавленого соляного палива в активній зоні реактора. Цей негативний температурний зворотний зв'язок дозволяє уникнути перегріву, забезпечуючи контроль рівня ядерної активності, навіть за умови втрати всіх систем управління. Розплавлене соляне паливо не руйнується під дією тепла або радіації, що забезпечує високу межу потужності соляного палива. Хоча в активну зону реактора IMSR інтегровані стрижні зупинки, вони призначені для оперативного управління, а не для забезпечення безпеки. Ці стрижні зупиняють реактор при втраті примусової циркуляції, а також вставляються при втраті живлення. Ще одним резервним механізмом зупинки є розплавлені контейнери, заповнені рідким поглиначем нейтронів, які назавжди зупинять реактор, якщо станеться малоймовірна подія - перегрів реактора.

Першим захисним екраном на шляху вивільнення продуктів поділу є фториста паливна сіль. Ця паливна сіль є хімічно стабільною і зв'язує хімічними іонними зв'язками переважну більшість радіоактивних продуктів поділу, що утворюються під час роботи реактора. Другим захисним екраном є активна зона реактора. Захисна оболонка, що оточує активну зону, слугує додатковим герметичним елементом на випадок вкрай малоймовірного руйнування цілісної активної зони. За відсутності джерел тиску в активній зоні або в захисній оболонці, захисна оболонка ніколи не зазнає впливу тиску.

Таблиця 3

Основні технічні показники Integral Molten Salt Reactor

Технічні показники	
Тип реактора	Реактор з розплавленою сіллю
Теплоносій/сповільнювач	Фториста паливна сіль/графіт
Номінальна потужність (теплова/електрична)	440 МВт / 195 МВт
Тип циркуляції теплоносія	Примусова циркуляція
Тиск первинного/вторинного контурів	< 0,4 МПа (гідростатичний)
Температура теплоносія на вході / виході	620 / 700 °C
Тип палива/тип ТВЕЛ	Розплавлене сольове паливо
Максимальний відсоток збагачення палива	<5%, низькозбагачений уран
Кількість ТВЗ	Кільцевий стрижень, 102 колона, 10 блоків / колона
Тривалість циклу однієї заправки паливом (в місяцях)	84; до заміни активної зони
Використання встановленої потужності	95%
Метод керування зміною потужності	Короткострокова: від'ємний температурний коефіцієнт Довгострокова: додавання рідкого палива в режимі безперервної роботи
Система безпеки	пасивна
Термін експлуатації (в роках)	56
Площа станції	45000 м^2
Висота/діаметр реактора	10/3,7 м
Вага	154000 метро-тон
Сейсмічне планування	0,3g
Особливості	Активна зона замінюється повністю, як один блок кожні сім років

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Перегрів захисної оболонки виключається балансом тепловиділення і теплових втрат до постійно працюючої внутрішньої допоміжної системи охолодження корпусу реактора (IRVACS).

Нове або "свіже" паливо окремо доставляється на майданчик електростанції у вигляді твердого палива, де воно розплавляється і додається в активну зону реактора IMSR. Це дозволяє IMSR працювати з оперативним завантаженням палива. Крім того, на відміну від реакторів на твердому паливі, немає необхідності видаляти будь-яке паливо з активної зони під час перевантаження. Все паливо залишається всередині закритої активної зони реактора IMSR протягом усього 7-річного періоду експлуатації активної зони. Невеликий об'єм додаткової солі для " поповнення" палива просто розміщується під час експлуатації у верхньому газосховищі. На відміну від інших реакторних систем, активна зона IMSR ніколи не розблоковується на території електростанції - ні під час пускового завантаження, ні під час підживлення, ні під час переходу на нову активну зону. Після ~7 років енергетичної експлуатації працююча активна зона зупиняється і після періоду охолодження відпрацьоване ядерне паливо викачується в баки витримки, розташовані всередині захисного корпусу реактора.

Унікальна система охолодження IMSR базується на властивостях і характеристиках IMSR-високій тепловій інерції, великій теплоємності та пасивній і безперервно діючій системі циркуляції теплоносія (IRVACS), що працює безперервно. Велика власна теплоємність забезпечується тепловою масою солі палива, металу корпусу реактора і сповільнювача з графіту 245.

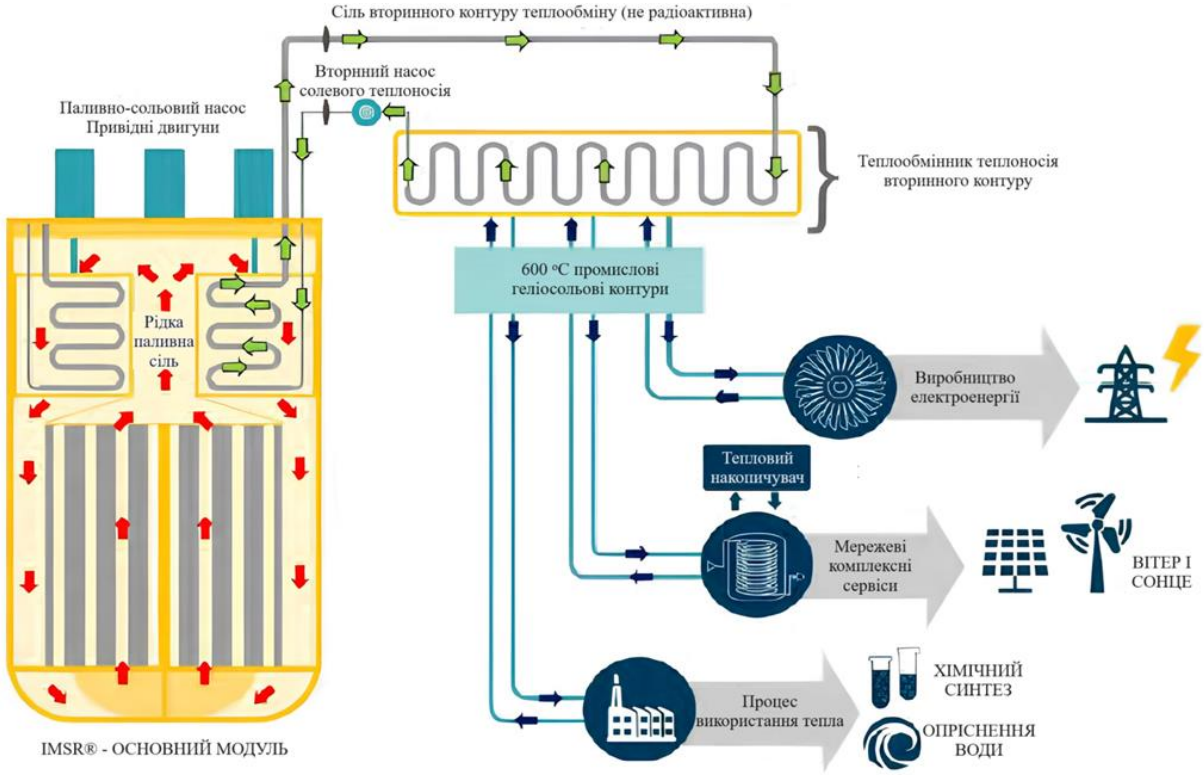

Рисунок 6 – Технологічний вигляд роботи реактора

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Крім того, корпус реактора не ізольований, що призводить до постійних теплових втрат у захисному корпусі і, зрештою, в системі IRVACS. Короткочасне охолодження активної зони забезпечується внутрішньою природною конвективною здатністю розплавленої фтористої паливної солі за рахунок природної і пасивної циркуляції паливної солі через первинні теплообмінники. Ці внутрішні та зовнішні механізми охолодження повністю здатні поглинати перехідне тепло та тепло, що утворюється при розпаді. Довготривале охолодження забезпечується за рахунок тепловтрат від неізольованого корпусу реактора до захисного корпусу, який охолоджується системою IRVACS. Захисний корпус - це закрита оболонка, яка охоплює активну зону реактора, забезпечуючи локалізацію і охолодження через стінку корпусу. Надмірне нагрівання активної зони призведе до збільшення тепловтрат з активної зони, що, в свою чергу, збільшить тепловіддачу через теплове випромінювання до захисної оболонки. Захисна оболонка, в свою чергу, оточена незалежним замкнутим контуром пасивного охолодження інертним газом IRVACS. Ця безперервно функціонуюча система IRVACS передає тепло від неізольованої захисної оболонки до інертного газу. Газ, у свою чергу, циркулює за допомогою природної конвекції до радіаторів у допоміжній будівлі реактора, де він віддає своє тепло зовнішньому повітрю, перш ніж повернутися в охолоджувальне кільце. Система охолодження IRVACS працює при атмосферному тиску, тому вона продовжуватиме охолоджувати в разі витоку або пошкодження системи. IMSR є рідкопаливним реактором - в активній зоні реактора немає жодного твердопаливного елемента. Паливо у вигляді тетрафториду урану (UF_4) розчиняється в плавкій суміші дешевих фтористих солей без додавання літію або берилію. Перевага цієї суміші полягає в тому, що вона зводить до мінімуму утворення тритію, який перешкоджає будь-якій проектній розробці ММР, що включає фторид літію (LiF) і/або дифторид берилію (BeF_2) в паливній соляній суміші. Рідка паливна сіль IMSR400 є цілісною системою - ядерне паливо, тепловиділяючий елемент і теплоносій - яка забезпечує основу для менш складної конфігурації реактора з багатьма параметрами безпеки. Разом ця сольова паливна суміш утворює як паливо, так і теплоносій першого контуру. Соляна суміш паливо-теплоносій прокачується між активною зоною з графітовим сповільнювачем (за тепловим спектром), а потім через вбудовані теплообмінники, щоб передати своє тепло в соляний контур вторинного теплоносія.

Мета забезпечення безпеки в конструкції IMSR полягає в досягненні високої внутрішньої надійності та створення безпечної атомної електростанції, яку можна залишити без нагляду. Для забезпечення основних функцій безпеки, таких як керування, охолодження та утримання, не потрібні дії оператора, електропостачання або механічні елементи, що живляться від зовнішніх джерел. Фундаментальним у філософії безпеки IMSR є усунення рушійних сил, які потенційно можуть виштовхнути радіоактивний матеріал з захисної оболонки в навколишнє середовище. Реактор працює при низькому тиску, що є перевагою використання термічно і хімічно стабільної суміші теплоносія з низькою концентрацією випарів палива. Крім того, в системі реактора немає води або пари. Такий підхід усуває будь-які потенційні джерела енергії, як фізичні, так

і хімічні, в реакторній системі. IMSR ще більше підвищує цей високий рівень внутрішньої безпеки завдяки своїй інтегрованій безтрубній, безвідмовній системній конструкції. Охолодження IMSR під час нештатних ситуацій не залежить від скидання тиску в реакторі або подачі зовнішнього теплоносія в реактор. Всі необхідні функції управління і тепловідведення присутні там, де вони потрібні - в активній зоні реактора IMSR і безпосередньо навколо неї. Таким чином, IMSR повністю усуває будь-яку залежність від допоміжних систем, клапанів, насосів, контролерів або дій оператора для охолодження. Це стосується як короткострокової, так і довгострокової перспективи. Це досягається завдяки тому, що конструкція IMSR поєднує технологію реактора з розплавленою сіллю з цілісною конструкцією реактора, оточеного захисним корпусом, який охолоджується безперервно працюючою системою охолодження IRVACS. Таким чином, конструкція IMSR забезпечує найвищий рівень внутрішньої безпеки і обіцяє досконалість ядерної безпеки з високою комерційною вигодою.

Основний блок IMSR спроектований таким чином, щоб його можна було легко та безпечно замінити. Це забезпечує високий експлуатаційний фактор використання електростанції IMSRі високу капітальну вартість. Змінна активна зона гарантує, що всі інші компоненти активної зони реактора відповідають проектним вимогам щодо терміну служби матеріалів; невиконання цієї умови часто називають перешкодою для безпосередньої реалізації ММР. Таким чином, перевага змінної активної зони полягає в тому, що електростанція забезпечує поєднання високої енергетичної потужності, простоти і легкості експлуатації та конкурентоспроможності за вартістю, що є важливим для широкого комерційного впровадження. Конструкція IMSR сприяє безпеці активної зони реактора завдяки внутрішнім властивостям паливної солі в поєднанні з сильно від'ємним температурним коефіцієнтом реактивності: при підвищенні температури реактивність знижується, і навпаки. Таким чином, IMSR має значну здатність реагувати на навантаження: зменшення відбору тепла парогенератором (або промисловим тепловим навантаженням) призводить до підвищення температури теплоносія, що знижує реактивність і, як наслідок, до зниження потужності реактора; і навпаки, збільшення відбору тепла знижує температуру теплоносія, що підвищує реактивність і збільшує потужність реактора.

IMSR не залежить від систем електропостачання або навіть систем управління і контролю для забезпечення максимальної безпеки. Функція контролю потужності реактора IMSR400 є невід'ємною частиною фундаментальних фізичних характеристик реактора і не вимагає наявності інженерної системи активної безпеки для підтримки контролю потужності в будь-якому проектному сценарії аварії. Система захисту інвестицій в станцію і система управління станцією забезпечують всі функції управління. Однак, на додаток до цього, IMSR400 містить положення для запуску одного з двох механізмів зупинки у випадку важких аварій. 246 Потужність реактора IMSR400 безпосередньо залежить від теплового навантаження контуру виробництва нітратної солі (потреба турбіни, потреба в теплі для технологічного процесу або потреба в теплі для промислових потреб). Це відбувається через притаманну реактору реакцію на зміни температури палива/теплоносія, спричинену змінами температури вторинного і третинного теплоносіїв. Тобто, реактивність зменшується при підвищенні температури солі палива і збільшується при зниженні температури солі палива.

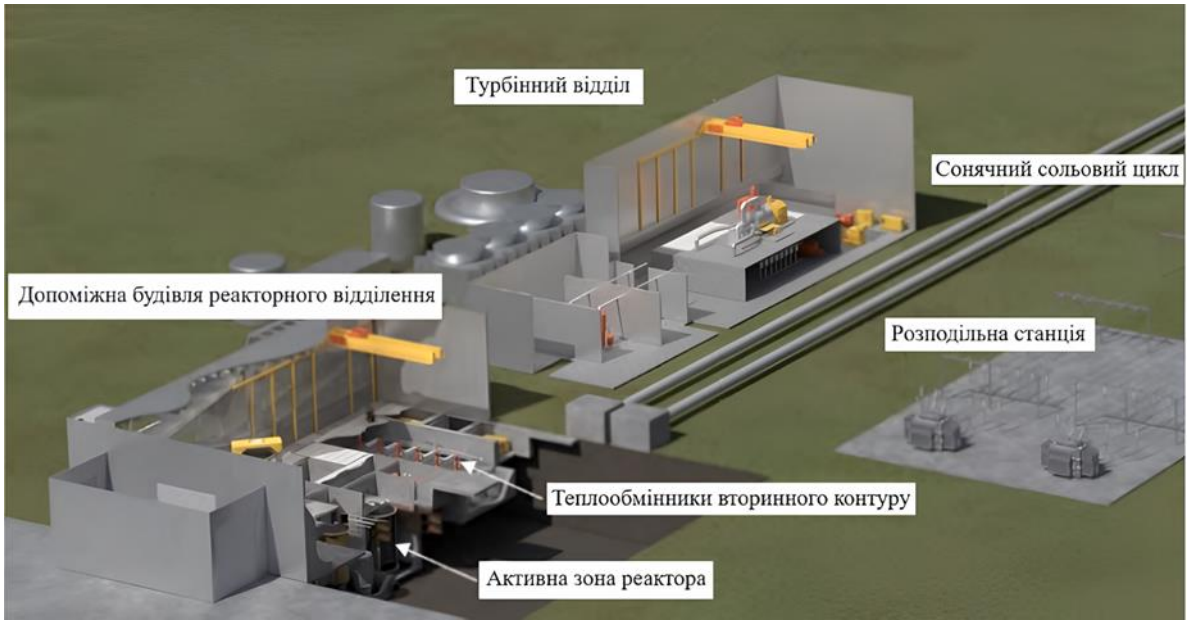

Рисунок 7 – Вигляд станції ззовні

Джерело: розроблено автором на основі [7].

Первинне регулювання реактивності досягається за допомогою насоса соляного теплоносія для зміни швидкості циркуляційного потоку, що змінює температуру солі в активній зоні і, таким чином, змінює реактивність. Паливна сіль термічно стабільна, має температуру кипіння, що значно перевищує робочу температуру IMSR, і стійка до розкладання; це усуває занепокоєння щодо перевищення температури при раптовому зменшенні відведення тепла від теплоносія реактора. Ці притаманні йому характеристики усувають необхідність у внутрішньореакторних пристроях контролю реактивності з метою зупинки реактора з міркувань безпеки. У короткостроковій перспективі функції системи регулювання потужності полягають у тому, щоб дозволити реактору узгодити потужність, що відбирається, з балансом теплового навантаження станції, і забезпечити, щоб температура солі залишалася в запланованих межах. У довгостроковій перспективі вигорання палива компенсується регулярним ручним додаванням невеликих кількостей свіжої паливної солі.

Схема заводу показана на наступному малюнку. Діюча активна зона IMSRрозміщена в одному з двох діючих модулів. Перед зупинкою активної зони виведення з експлуатації в кінці терміну експлуатації, нова активна зона встановлюється в сусідньому робочому приміщенні для підготовки до перемикання соляного контуру вторинного теплоносія з діючої активної зони, що відпрацювала свій ресурс, на нову активну зону. Після заміни відпрацьована активна зона залишається в робочому приміщенні до тих пір, поки не буде до вивантаження палива в баки для зберігання солі відпрацьованого ядерного палива. Потім вивантажену активну зону переміщують мостовим краном з експлуатаційного сховища до сховища солі відпрацьованого ядерного палива. Третя активна зона може бути згодом встановлена в порожньому робочому приміщенні, готовому до початку наступного 7-річного експлуатаційного циклу, після того, як другий діючий блок з активною зоною досягне кінця терміну експлуатації і буде закритий. Соляні лінії вторинного (нерадіоактивного) теплоносія передають тепло від первинних теплообмінників активної зони теплоносія до вторинних теплообмінників і третього, нітратного сольового контуру, розташованого в межах атомної електростанції. Нітратний соляний контур передає тепло з атомної електростанції на парогенератори і повторні підігрівачі, розташовані на балансі станції, або безпосередньо на промислові підприємства, що знаходяться на АЕС, а також безпосередньо до промислового кінцевого споживача тепла, який може бути розташований на відстані до 5 км від станції.

Паливо може складатися з фториду низькозбагаченого урану, фториду плутонію, фториду торію або будь-якої їх суміші. Однак перший у своєму роді IMSR400 використовуватиме однократний паливний цикл на низькозбагаченому урані, оскільки це найпростіший варіант. Відпрацьоване рідке паливо набагато легше переробляти, ніж твердопаливні елементи, що робить його переробку більш привабливою. У разі застосування переробки палива, компанія Terrestrial Energy передбачає, що це відбуватиметься в центральному пункті переробки палива, який обслуговуватиме багато електростанцій IMSR.

ВИСНОВКИ

Враховуючи дану ситуацію в країні, потреби заміни як старих блоків на наявних АЕС, так і заміна ТЕС і ТЕЦ на більш екологічні та дешевші в експлуатації станції, важливо зробити правильний вибір при можливому будівництві станцій типу ММР. Досвід України у використанні водо-водяних реакторах на АЕС, певно кращим буде вибір саме NUWARD, поводження з реакторами такого типу вже відоме та не потребуватиме перенавчання персоналу для можливого їх переведення на ММР. NUWARD має багато спільного з традиційними водо-водяними реакторами, і його впровадження може бути менш витратним і менш складним у порівнянні з іншими типами ММР. Крім того, цей вибір може сприяти забезпеченню стабільності в енергетичному секторі та збереженню накопиченого досвіду та експертизи персоналу. Такий підхід дозволить використовувати існуючу інфраструктуру та ресурси, що може значно спростити і прискорити процес впровадження ММР в Україні. Крім того, це може сприяти зниженню ризиків, пов'язаних з перехідним періодом та забезпечити більш плавний перехід до нових технологій у ядерній енергетиці. Також важливим фактором є номінальна потужність даного типу ММР, яка становить 340 МВт сумарної електричної потужності, що виробляється з двох модулів. Показник еквівалентної вартості будівництва станції на одиницю виробленої електроенергії нижче ніж у SC-HTGR та IMSR, через власне ефект масштабування, що визначає більш економічно привабливими саме станції з більшою номінальною електричною потужністю, так як еквівалентні витрати на будівництво будуть меншими. Тип палива також ідентичний тому, що використовується на наявних в Україні АЕС, механізми переробки і зберігання яких вже налагоджені в Україні, згідно з підписаними контрактами. Термін експлуатації даного ММР дещо менший, ніж у SC-HTGR, але він нівелюється іншими факторами, що були наведені вище.

Отже, найпривабливішим у власне введені в експлуатацію в нашій країні є саме ММР типу NUWARD.

Список літератури:

1. Перспективи впровадження технологій використання малих модульних реакторів. Режим доступу URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/19751/16382

2. Розвиток атомної енергетики у світі. Режим доступу URL: https://www.uatom.org/2015/08/14/rozvytok-atomnoyi-energetyky-u-sviti.html

3. Що таке малі модульні реактори, будівництво яких розглядає Україна. Режим доступу

URL: https://biz.censor.net/resonance/3403084/scho_take_mali_modulni_reaktory_budivnytstvo_yakyh_rozglyadaye_ukrayina

4. Аналіз функціонування малих модульних реакторів типу CAREM. Режим доступу URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/18531/15357

5. Малі модульні реактори як альтернатива ТЕС: чисто, маневрово, ефективно. Режим доступу URL: https://infoatom.news/2023/01/06/060120231211

6. "Енергоатом" і Holtec вироблятимуть в Україні обладнання для ММР. Режим доступу URL: https://ua-energy.org/uk/posts/enerhoatom-i-holtec-vyrobliatymut-v-ukraini-obladnannia-dlia-mmr

7. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition. Austria, September 2020. URL: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf.