

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ АКТИВНОЇ ЗОНИ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ, ЩО ОХОЛОДЖУЮТЬСЯ ВОДОЮ ПІД ТИСКОМ, В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ ТЕПЛОНОСІЯ

У даній статті проведено дослідження основних особливостей малих модульних реакторів, що охолоджуються водою під тиском та аналіз впливу визначених особливостей на теплогідрравлічний розрахунок активної зони.

Особлива увага надана малим модульним реакторам з природньою циркуляцією теплоносія. Визначено, що при розрахунку активної зони природна циркуляція має вплив на визначення втрат тиску та коефіцієнт тепловіддачі. При визначенні втрат тиску різниця між природньою та вимушеною циркуляцією теплоносія полягає в складових втрат тиску, які необхідно враховувати. При визначенні коефіцієнту тепловіддачі головним є визначення числа Нусельта, де режим циркуляції впливає на визначальні критерії. Також розглянуто питання визначення критичного теплового потоку за допомогою методу CHF GROENEVELD LOOK UP TABLET для подальшого визначення запасу до кризи теплообміну, який слугує для оцінки безпеки експлуатації установки.

В якості прикладу під час дослідження було виконано теплогідрравлічний розрахунок активної зони малого модульного реактора Holtec SMR-160, як одного з передових представників даного типу реакторів. У результаті проведеного розрахунку було отримано значення втрат тиску, розподіл коефіцієнту теплопередачі по висоті активної зони та мінімальний запас до кризи теплообміну.

Ключові слова: атомна енергетика, активна зона, теплогідрравлічний розрахунок, природна циркуляція, малий модульний реактор, Holtec SMR-160.

Вступ

Атомна енергетика активно розвивається в усьому світі, де одним з перспективних напрямків її розвитку є малі модульні реактори (ММР). Згідно визначення МАГАТЕ малі модульні реактори – це сучасні ядерні реактори з електричною потужністю до 300 МВт, компоненти та системи яких можуть бути виготовлені на заводі, а потім у вигляді модулів транспортуватися на місце встановлення [1]. Значне зростання зацікавленості до ММР протягом останнього десятиліття зумовлено, перш за все, підвищеною безпечністю, а також рядом значних економічних переваг, які включають в себе менші капітальні інвестиції та коротший час будівництва [2]. Наразі передовими вважаються реактори NuScale Power Module, Holtec SMR-160, Westinghouse SMR.

ММР є новою технологією з точки зору комерційного виробництва електроенергії, тому гостро стоїть питання безпечності їх експлуатації [2]. Оскільки в Україні існують великі перспективи побудови ММР, безпечність експлуатації буде відігравати ключове значення під час процесу ліцензування [3]. Саме для підтвердження необхідного рівня безпеки експлуатації та отримання ліцензії [4] буде виконуватись значна кількість розрахунків, де теплогідрравлічний розрахунок активної зони є одним з ключових етапів.

Мета та завдання

Метою роботи є розробка методики теплогідрравлічного розрахунку активної зони малих модульних реакторів з водою під тиском, з урахуванням особливостей, що обумовлені природною циркуляцією теплоносія. Для апробації методики виконати теплогідрравлічний розрахунок активної зони для ММР Holtec SMR-160.

Матеріал і результати досліджень

ММР розробляються в різних країнах, однак можна виділити наступні особливості, які присутні в більшості проєктів: інтегральна компоновка та використання пасивних систем безпеки [5].

Інтегральна компоновка полягає в тому, що перший контур, включно з парогенератором, знаходиться в одному корпусі. Таким чином відсутня велика кількість трубопроводів та значно зменшується площа реакторного відділення. Також це дозволяє у разі аварії повністю ізолювати перший контур. Пасивні системи безпеки працюють автоматично без втручання персоналу, за рахунок природніх процесів. Такий підхід значно зменшує імовірність помилок персоналу та значно полегшує експлуатацію, додатково значно підвищуючи підвищує безпечність експлуатації [6].

Завдяки відносно невеликій потужності ММР, є можливість реалізації природної циркуляції теплоносія, що має підвищити безпечність установки, і це особливо стосується подій із втратою зовнішніх джерел енергоживлення. Проекти ММР з вимушеною циркуляцією теплоносія з точки зору теплогідравлічного розрахунку циркуляційної петлі першого контуру є класичними реакторами і їх розрахунок значною мірою не відрізняється від розрахунків реакторів великої потужності, він навіть спрощується за рахунок відсутності великої кількості трубопроводів [7]. Але у випадку природної циркуляції різниця у визначенні деяких параметрів є доволі суттєвою.

Дві категорії процесів локального переносу в активній зоні можуть впливати на поведінку природної циркуляції в системі. Перша категорія — тепловіддача палива, оскільки цей механізм забезпечує різницю густини теплоносія, яка керує природним циркуляційним потоком. Друга категорія – це перепад тиску в активній зоні, який, як правило, є найбільшим джерелом опору потоку в контурі з природною циркуляцією [6].

Швидкість природної циркуляції в контурі в усталеному стані визначається з балансу між рушійною силою та силою опору. Рушійна сила є результатом різниці густин гарячого та холодного теплоносія. Сила опору виникає через втрати тиску в системі. Втрати тиску в активній зоні в загальному випадку визначається наступним чином [8]:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \sum \Delta p_{\text{м}} + \rho gh + \Delta p_{\text{пр}}$$

Де $\Delta p_{\text{тр}}$ – втрати тиску на тертя в пучку стрижнів, що омиваються поздовжньо, [Па];

$\sum \Delta p_{\text{м}}$ – сумарні втрати тиску на місцевих опорах, [Па];

$\Delta p_{\text{пр}}$ – втрати тиску на прискорення потоку, внаслідок зміни геометрії чи густини рідини, [Па];

ρgh – нівелірна складова втрат тиску, яка враховує вплив сил гравітації на потік теплоносія, [Па].

При теплогідравлічному розрахунку активної зони в умовах вимушеної циркуляції теплоносія зазвичай не враховують втрати тиску на прискорення потоку [9]. При розрахунку в умовах природної циркуляції втрати тиску на прискорення потоку є важливою складовою і обов'язково мають бути враховані [6]. Однак більш цікава ситуація з нівелірною складовою втрат тиску. На рисунку 1 представлено схематичне зображення контуру циркуляції ММР. Під час підйому теплоносія сили гравітації спрямовані проти напрямку потоку, однак після розвороту теплоносія їх напрям співпадає, таким чином вплив сил гравітації самокомпенсується. Відповідно, під час розрахунку втрат тиску в контурі з природною циркуляцією нівелірна складова втрат тиску не враховується. Важливо зазначити, що вплив сили гравітації є важливим при визначенні висоти контуру, оскільки розворот теплоносія відбувається в момент, коли підйомна сила не здатна подолати вплив сил гравітації. Це є однією з причин чому ММР з природною циркуляцією теплоносія мають велику висоту корпусу [6].

Рушійною силою в контурі з природною циркуляцією теплоносія є різниця його густини внаслідок нагрівання від палива [8]. Теплоносій нагрівається за рахунок теплоти, яку отримує від палива, тому необхідно правильно визначити коефіцієнт тепловіддачі [6], котрий можна визначити наступним чином [10]:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{ст}}}{d}$$

Де $\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки, [Вт/(м·К)];

d – характерний розмір, [м];

Nu – число Нусельта.

Саме визначення числа Нусельта є основною проблемою при розрахунку коефіцієнту тепловіддачі при природній циркуляції теплоносія, оскільки всі наразі існуючі кореляції мають емпіричний характер. Вирішення цієї задачі аналітичним шляхом є дуже важким з кількох причин: геометрія тепловиділяючої збірки є складною, сам процес має складний характер, людство має недостатнє розуміння залучених процесів [6]. Питання складної геометрії тепловиділяючої збірки зазвичай вирішують застосуванням підходу з заміною її на еквівалентну простішу геометрію, наприклад, циліндр еквівалентного діаметру. У випадку природної циркуляції такий метод теж доцільно використовувати [11].

Характерними величинами при визначенні числа Нусельта у випадку природної циркуляції є число Грасгофа та число Прандтля [12]. Режим руху рідини в умовах природної конвенції визначається у залежності від значення добутку числа Грасгофа та числа Прандтля. Важливо зазначити, що при турбулентному русі рідини коефіцієнт тепловіддачі не залежить від характерного розміру і його зміна може відбуватись залежно від зміни параметрів теплоносія та різниці температур. При перехідному режимі руху рідини коефіцієнт тепловіддачі є нестабільним однак його значення в середньому збільшуються до значень характерних для турбулентного руху рідини [12].

Однією з головних цілей теплогідравлічного розрахунку активної зони є оцінка безпеки її експлуатації, одним з показників безпечності є запас до кризи теплообміну [11]. Криза теплообміну виникає, коли тепловий потік підвищується до такого високого рівня, що нагріта поверхня більше не може підтримувати постійний контакт рідини. Цей тепловий потік зазвичай називають критичним тепловим потоком. Він характеризується або раптовим підвищенням температури поверхні, викликаним покриттям нагрітої поверхні стабільним шаром пари, або невеликими стрибками температури поверхні, що відповідають появі та зникненню сухих плям. Механізми критичного теплового потоку залежить від режимів течії та розподілу фаз, які, у свою чергу, контролюються тиском, витратою теплоносія і витратним масовим паровмістом. Питання визначення критичного теплового потоку має схожі проблеми, як і у випадку визначення коефіцієнту тепловіддачі, він має складний характер, який важко описати аналітично, а існуючі кореляції мають емпіричний характер [6]. Найкращим наразі методом для визначення критичного теплового потоку є метод CHF GROENEVELD LOOK-UP TABLE (оглядова таблиця критичних теплових потоків). Суть методу полягає в тому, аби за допомогою таблиці критичних теплових потоків (КТП), представленої в [13] додаток С, визначити значення критичного теплового потоку за допомогою відповідних значень тиску, витрати та якості пари. В таблиці КТП зібрано велику кількість експериментальних даних, отриманих в різних умовах. Межі таблиці (КТП) охоплюють такі значення параметрів: тиск від [0,1 до 20 МПа], витрата від 0 до 7500 [кг/(м²·с)], витратний масовий паровміст від [-50 до 100%]. У випадках, коли параметри установки не попадають в чітко визначені межі даних, необхідне значення критичного теплового потоку можна визначити шляхом лінійної інтерполяції. Однак для отримання даних, представлених у таблиці ТКП, досліди виконувались в лабораторних умовах для однієї трубки [13]. Тому значення критичного теплового потоку, отримане з таблиці, не враховує особливості геометрії активної зони. Відповідно, у [14] були розроблені коригуючі коефіцієнти, які враховують особливості активної зони реактора, і критичний тепловий потік пропонується визначити наступним чином:

$$q_{кр.пуч} = q_{кр.таб} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8$$

Де $q_{кр.таб}$ – значення критичного теплового потоку отриманого з таблиці ТКП, [кВт/м²];

$K_1 - K_8$ – визначені поправочні коефіцієнти, зміст яких наведено в таблиці 1.

Спосіб визначення цих факторів описано в IAEA TECDOC-1474 [6], але всі вони були отримані емпіричним шляхом та мають межу застосування. Слід зауважити, що останній коефіцієнт, зазвичай, не враховується у випадку розрахунку для активної зони реактору, оскільки під час роботи відсутні такі низькі значення витрати, а коефіцієнт, що враховує напрям потоку, можна приймати рівним одиниці [14]. Визначення критичного теплового потоку дає змогу визначити коефіцієнт запасу до кризи теплообміну, який визначається відношенням критичного теплового потоку до фактичного теплового потоку [9]:

$$K = \frac{q_{кр.пуч}}{q_{ф}}$$

CHF GROENEVELD LOOK-UP TABLE метод є універсальним і може використовуватись, для будь яких реакторів з водяним теплоносієм та для будь яких режимів циркуляції. Сама таблиця постійно розширюється, після проведення нових експериментів та досліджень [13].

Таблиця 1 – Поправочні коефіцієнти для врахування особливостей активної зони та ТВЗ.

№	Позначення	Визначення
1	K_1	Коефіцієнт, що враховує геометрію поперечного перерізу прохідного каналу
2	K_2	Коефіцієнт, що враховує геометрію пучка стрижнів
3	K_3	Коефіцієнт, що враховує геометрію дистанціюючої решітки
4	K_4	Коефіцієнт, що враховує довжину обігріву
5	K_5	Коефіцієнт, що враховує аксіальну нерівномірність енерговиділення
6	K_6	Коефіцієнт, що враховує радіальну нерівномірність енерговиділення
7	K_7	Коефіцієнт, що враховує напрям руху потоку
8	K_8	Коефіцієнт, що враховує особливості руху при малих значеннях витрати

За розробленою методикою, яка враховує зазначені особливості, виконано теплогідравлічний розрахунок активної зони малого модульного реактору Holtec SMR-160 з природною циркуляцією

теплоносія. Розрахунок проводився для середньо та максимально навантаженої тепловиділяючої збірки (ТВЗ).

Holtec SMR-160 – це малий модульний реактор, який розробляється американською компанією Holtec International [15]. Параметри Holtec SMR-160 представлені в таблиці 2, а спрощена схема циркуляції теплоносія на рисунку 2. Ключовими особливостями реактору є інтегральна компоновка, активне використання пасивних систем безпеки та природна циркуляція теплоносія. Майже всі системи безпеки першого контуру є повністю пасивними, це має значно зменшити вплив людського фактору у випадку аварій, а відсутність великої кількості активного обладнання значно збільшує надійність систем. Згідно заяв компанії Holtec International, за допомогою пасивних систем в разі аварії реактор може протягом тридцяти днів знаходитись в безпечному стані без втручання персоналу [15]. Наразі реактор знаходиться на стадії підготовки до ліцензування, яке планується розпочати на початку 2024 року [5].

Таблиця 2 – Основні параметри Holtec SMR-160 [5].

Теплова потужність, [МВт]	525
Електрична потужність, [МВт]	160
Тиск в першому контурі, [Мпа]	15,5
Тиск в другому контурі, [Мпа]	3,4
Температура на вході в активну зону, [°C]	241
Температура на виході з активної зони, [°C]	321
Кількість паливних збірок, [шт]	57
Паливо	17 x 17 GAIA
Збагачення палива, %	4
Паливна кампанія, місяці	24
Висота активної зони, [м]	3,66
Діаметр активної зони, [м]	1,94

В якості отриманих результатів теплогідравлічного розрахунку представлені втрати тиску, розподіл яких представлено в таблиці 3, розподіл коефіцієнту тепловіддачі по висоті активної зони, (рисунк 3), а також у результаті розрахунку було отримано мінімальне значення запасу до кризи теплообміну.

Отримані значення добутку чисел Грасгофа та Прандтля свідчать, що в активній зоні реактора Holtec SMR-160 спостерігається розвинений турбулентний рух рідини, тобто значення $Gr \cdot Pr \geq 6 \cdot 10^{10}$, ці значення наведені в таблиці 4, відповідно до точок по висоті активної зони в яких виконувався розрахунок. Число Нусельта розраховане за формулою, наведеною в [12], для умов турбулентного руху рідини при природній циркуляції теплоносія:

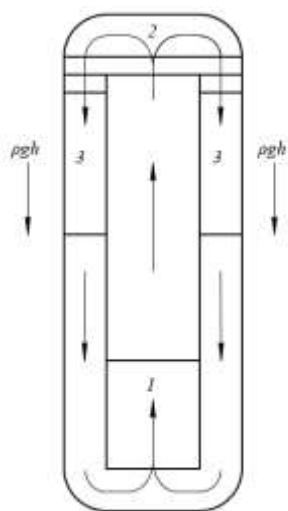
$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr_p)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

Таблиця 3 – Розраховані значення втрат тиску через активну зону Holtec SMR-160.

Назва	Середньо навантажена збірка	Максимально навантажена збірка	Одиниці виміру
Втрати тиску на прискорення потоку	213,7	282,6	Па
Місцеві втрати тиску	1974,8	2612,7	Па
Втрати тиску на тертя	6478,9	8348,9	Па
Загальні втрати тиску через активну зону	8667,5	11244,3	Па

Таблиця 4 – Значення добутку чисел Грасгофа та Прандтля, отримані під час теплогідравлічного розрахунку активної зони реактора Holtec SMR-160.

Висота активної зони	Середньо навантажена ТВЗ	Максимально навантажена ТВЗ
-1,83	8,35E+13	1,36E+14
-1,22	2,28E+14	4,22E+14
-0,915	2,82E+14	5,28E+14
0	3,92E+14	7,41E+14
0,915	3,72E+14	7,35E+14
1,22	3,19E+14	6,52E+14
1,83	3,47E+14	7,25E+14



1-активна зона, 2-компенсатор тиску,
3-парогенератор

Рисунок 1 – Схематичне зображення контуру циркуляції ММР.

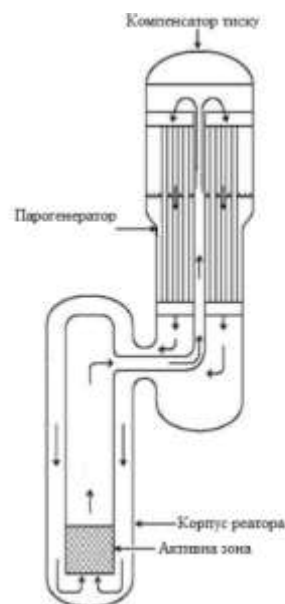


Рисунок 2 – Спрощена схема циркуляції теплоносія в Holtec SMR-160 [15].

Мінімальне значення коефіцієнту запасу до кризи теплообміну отримане в ході розрахунку складає 1,32. Таке низьке значення запасу до кризи теплообміну спричинене низьким значенням критичного теплового потоку, що є одним з головних недоліків систем з природною циркуляцією теплоносія. Зазвичай прийнято вважати, що 1,3 є мінімально допустимим для безпечної експлуатації ядерних реакторів з водою під тиском [11]. Однак важливою особливістю систем з природною циркуляцією є залежність значення витрати від теплового потоку, зі збільшенням якого відбувається збільшення витрати, а, відповідно, збільшується тепловідведення від активної зони та значення критичного теплового потоку [6].

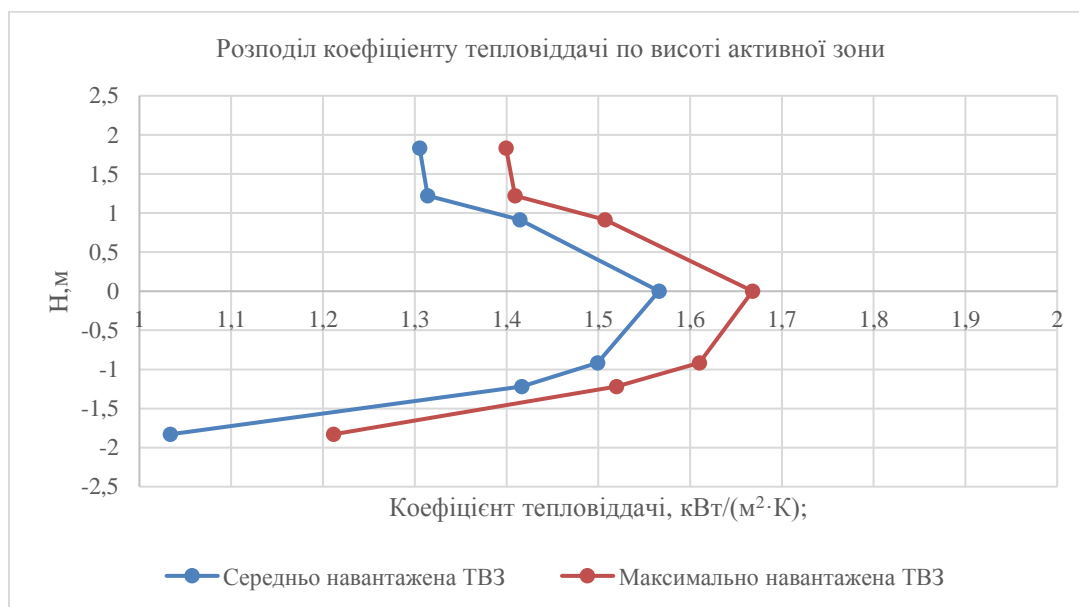


Рисунок 3 – Графік розподілу коефіцієнту тепловіддачі по висоті активної зони

Висновки

При теплогідрравлічному розрахунку активної зони малого модульного реактору з природною циркуляцією теплоносія необхідно враховувати вплив природної циркуляції на визначення таких параметрів як втрати тиску, коефіцієнт тепловіддачі та коефіцієнт запасу до кризи теплообміну. Правильне визначення втрат тиску є критично важливим, для подальшого визначення швидкості циркуляції. Під час визначення коефіцієнту необхідно використовувати кореляції в яких визначальними є число Грасгофа та

число Прандтля, які є визначальними при визначенні режиму руху рідини. Значення критичного теплового потоку доцільно визначати універсальним методом CHF GROENEVELD LOOK-UP TABLE.

Згідно отриманих результатів розрахунку для Holtec SMR-160 можна побачити, що втрати тиску є доволі незначними, значення коефіцієнту тепловіддачі по висоті активної зони для середньо навантаженої та максимально навантаженої тепловиділяючої є цілком прийнятним, а його зміна характеризується зміною різниці температури між паливом та теплоносієм. Отриманий в результаті розрахунку коефіцієнт запасу до кризи теплообміну, хоч і є близьким до мінімально допустимого значення, але з урахуванням особливостей природної циркуляції теплоносія, є цілком прийнятним, однак потребує подальшого аналізу в ході оцінки безпеки реакторної установки. На даному етапі можна казати, що реакторна установка Holtec SMR-160 є яскравим представником малих модульних реакторів з природною циркуляцією теплоносія, а отримані результати доводять безпечність її експлуатації.

Список використаної літератури

1. Liou J. What are Small Modular Reactors (SMRs)? International Atomic Energy Agency | Atoms for Peace and Development. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> (date of access: 22.11.2023).
2. Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm. The IAEA Platform on Small Modular Reactors and their Application. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/Small%20Modular%20Reactors%20a%20new%20nuclear%20energy%20paradigm.pdf> (date of access: 19.11.2023)
3. Особливості MMP та їх перспективи в Україні: огляд від експерта ДНТЦ ЯРБ. ДНТЦ ЯРБ. URL: <https://sstc.ua/news/osoblivosti-mmr-ta-yih-perspektivi-v-ukrayini-oglyad-vid-eksperta-dntc-yarb> (дата звернення: 22.11.2023).
4. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 08.02.1995 р. № 39/95-ВР : станом на 1 жовт. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-vr#Text> (дата звернення: 18.11.2023).
5. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). IAEA Department of Nuclear Energy, 2022. 424p. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/2022%20IAEA%20SMR%20ARIS%20Booklet.pdf> (date of access: 19.11.2023)
6. Natural circulation in water cooled nuclear power plants. Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. IAEA Department of Nuclear Energy, 2005. 649p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf (date of access: 25.11.2023)
7. Natural circulation data and methods for advanced water cooled nuclear power plant designs. Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna. IAEA Department of Nuclear Energy, 2000. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1281_prn.pdf (date of access: 22.11.2023).
8. D'Auria F. Thermal Hydraulics in Water-Cooled Nuclear Reactors. University of Pisa, 2017.
9. Теплогідрравлічні процеси в енергетичних установках. Розрахунова робота: навч. посіб. для студ. спеціальності 143 «Атомна енергетика», спеціалізації «Атомні електричні станції» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.Ю.Кравець, Є.С. Алексеїк, О.С.Алексеїк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 39 с.
10. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) . Москва: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.
11. Tong L.S., Weisman J. Thermal analysis of pressurized water reactor. Third Edition. Amer Nuclear Society, 1996. 748 p.
12. Исаченко В., Осипов В., Сукомел А. Теплопередача. Москва : Энергоиздат, 1981. 416 с.
13. Groeneveld D.C. Critical Heat Flux Data Used to Generate the 2006 Groeneveld Lookup Tables. Thermalhydraulics Consultants, Inc., 2016. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1902/ML19029B306.pdf> (date of access: 23.11.2023).
14. Cheng X., Mueller U. Review on critical heat flux in water cooled reactors. Germany, 2003. 42p.
15. Holtec International - Small Modular Reactor. URL: <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/> (date of access: 18.11.2023).

V. Konshin¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2591-3589

P. Kravchenko¹, master student, ORCID 0009-0004-8309-0693

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SPECIFIC OF THERMOHYDRAULIC CALCULATIONS OF CORE PRESSURIZED WATER SMALL MODULAR REACTORS IN CASE NATURAL CIRCULATION OF THE COOLANT

The article has been devoted to the study of the main features of pressurized water small modular reactors and an analysis of the influence of the specified features on the thermohydraulic calculation of the core.

Special attention is given to small modular reactors with natural circulation of the coolant. It was determined that in the calculation of the core, natural circulation affects the determination of pressure losses and the heat transfer coefficient. When determining pressure losses, the difference between natural and forced coolant circulation lies in the components of pressure losses that need to be considered. In the determination of the heat transfer coefficient, the key factor is the determination of the Nusselt number, where the circulation flow regime affects determining criteria. The issue of determining the critical heat flow using the CHF LOOK UP TABLET method is also considered for the further determination of the departure from nuclear boiling, which serves to assess the safety of operation of the installation.

As an example, during the study, a thermohydraulic calculation of the core of the small modular reactor Holtec SMR-160, as one of the advanced representatives of this type of reactor, was performed. As a result of the conducted calculation, the value of pressure losses, the distribution of the heat transfer coefficient and the minimum departure from nuclear boiling were obtained. The study shows the departure from nuclear boiling obtained as a result of the calculation is close to the minimum allowable value, but it is quite acceptable considering the characteristics of natural coolant circulation. However, it necessitates further analysis during the assessment of the reactor facility's safety.

Keywords: nuclear energy, core, thermohydraulic calculation, natural circulation, small modular reactor, Holtec SMR-160.

References

1. J. Liou, International Atomic Energy Agency (2023, Sept.13) “What are Small Modular Reactors (SMRs)?” [Online]. Available: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>.
2. International Atomic Energy Agency, *Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm*. [Online]. Available: <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/Small%20Modular%20Reactors%20a%20new%20nuclear%20energy%20paradigm.pdf>
3. State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, *Features of MMR and their prospects in Ukraine: a review by an expert of the SSTC*. [Online]. Available: <https://sstc.ua/news/osoblivosti-mmr-ta-yih-perspektivi-v-ukrayini-oglyad-vid-eksperta-dntc-yarb>
4. On the use of nuclear energy and radiation safety: Law of Ukraine dated February 8, 1995 No. 39/95-VR: as of October 1 2023. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-вр#Text>.
5. International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*, 2022. 424p. [Online]. Available: <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/2022%20IAEA%20SMR%20ARIS%20Booklet.pdf>
6. IAEA Department of Nuclear Energy, *Natural circulation in water cooled nuclear power plants. Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments*, 2005, 649p. [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf
7. IAEA Department of Nuclear Energy, *Natural circulation data and methods for advanced water cooled nuclear power plant designs. Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna*, 2000 [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1281_prn.pdf
8. F. D’Auria, *Thermal Hydraulics in Water-Cooled Nuclear Reactors*. University of Pisa, 2017.
9. V.Y. Kravets, E.S. Alekseik, and O.S. Alekseik, *Thermohydraulic processes in power plants. Calculation work: training. manual for students specialty. 143 "Nuclear Energy", specialization "Nuclear Electric Stations"*. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2020, p. 39.
10. P.L.Kirillov, Y.S Yuryev and V.P Bobkov, *Handbook of thermal-hydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)*. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 296 p.
11. L.S Tong and J. Weisman, *Thermal analysis of pressurized water reactor*, 3rd edition. Amer Nuclear Society, 1996.
12. V. Isachenko., V. Osipov and A. Sukomel, *Heat transfer*. Moscow: Energoizdat, 1981, p.416.
13. D.C Groeneveld, *Critical Heat Flux Data Used to Generate the 2006 Groeneveld Lookup Tables*. Thermalhydraulics Consultants, Inc., 2016. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML1902/ML19029B306.pdf>
14. X. Cheng and U.Mueller, *Review on critical heat flux in water cooled reactors*. Germany, 2003, p.42.
15. Holtec International - Small Modular Reactor. [Online]. Available: <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/>

Надійшла: 11.01.2024
Received: 11.01.2024