

Дослідження процесів у системі герметичного огородження із застосуванням кодів ATHLET-CD та COCOSYS

- **Вишемірський М. П.**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9008-6308>
- **Пустовіт В. В.**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0359-6458>
- **Кравченко В. П.**
Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7557-3327>
- **Донський Д. О.**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6334-9555>

Наведено опис проведених модифікацій розрахункових моделей ВВЕР-440/B213 для кодів ATHLET-CD 3.1A (модель реакторної установки) та COCOSYS 2.4v5 (модель системи герметичних огорожень), а також результати автономних та поєднаних розрахунків аварії з течею теплоносія першого контуру Ду 200 мм та повним знеструмленням енергоблока № 1 Рівненської атомної електростанції (РАЕС). Модель для коду ATHLET-CD 3.1A була доповнена модулем важкого пошкодження активної зони (ECORE), що дозволило проаналізувати події до моменту відмови днища корпусу реактора.

Порівняння результатів автономних та поєднаних розрахунків кодами ATHLET-CD 3.1A та COCOSYS 2.4 демонструє майже однакову поведінку основних параметрів на початкових етапах аварії. Деякі незначні відмінності виникають через наявність мінімальної різниці в масових витратах води та пари з розриву, а також через присутню в поєднаному розрахунку теплопередачу від теплових структур першого контуру до атмосфери приміщень системи герметичного огородження (СГО). Водночас впродовж середньої та пізньої фаз аварії виникають більш значні відмінності між результатами автономних та поєднаного розрахунків, спричинені різною кількістю винесених у СГО продуктів поділу та аерозолів. Зазначене дозволяє рекомендувати до застосування саме поєднання («зв'язку») кодів/моделей для проведення чисельного аналізу аварії.

Ключові слова: важка аварія, ВВЕР-440, розрахункова модель, ATHLET-CD, COCOSYS.

© Вишемірський М. П., Пустовіт В. В., Кравченко В. П., Донський Д. О., 2020

Питання підвищення безпеки атомної енергетики щоразу набувало актуальності після аварій на АЕС, кожна з яких давала новий поштовх у дослідженнях та методології аналізу безпеки. Остання із значних аварій, яка відбулась на АЕС Фукусіма-1, не стала винятком та призвела до оновлення вимог з безпеки АЕС у документах Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [1], директивах Євро-

пейської спільноти з атомної енергії (EURATOM) [2], документах Асоціації регулюючих органів з ядерної безпеки країн Західної Європи (WENRA) [3] тощо. Особливу увагу почали приділяти аваріям із важким пошкодженням ядерного палива (ВА) як під час проєктування нових енергоблоків АЕС, так і під час переоцінки безпеки діючих енергоблоків. Основна мета таких аналізів – розробка

та впровадження технічних засобів і стратегій для пом'якшення наслідків ВА [4].

Розрахунковий аналіз перебігу ВА виконується з використанням інтегральних програмних кодів для аналізу ВА, таких як MELCOR (розроблений Національною лабораторією Sandia, США), ASTEC (удосконалення та підтримку якого наразі здійснює Інститут з ядерної та радіаційної безпеки Франції (IRSN)), ICARE/CATHARE (також застосовується IRSN) та ін., і відповідних розрахункових моделей, які розробляються користувачами таких кодів з урахуванням специфічних особливостей об'єкта, що досліджується (енергоблока АЕС чи експериментальної установки).

Наразі переважна більшість розрахункових аналізів ВА в Україні виконується експлуатуючою організацією (ЕО) за допомогою теплогідрравлічного коду MELCOR. Експерти Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ) для перевірки коректності результатів і висновків з аналізу безпеки та досліджень, здійснених ЕО, проводять значну кількість розрахунків сценаріїв ВА. Для переважної більшості таких розрахунків застосовують теплогідрравлічний код MELCOR з використанням власних моделей, незалежних від тих, що використовуються ЕО. Можливість проведення таких оцінок за допомогою інших (альтернативних) кодів підвищує якість експертних оцінок. Одним із можливих варіантів альтернативних аналізів є застосування кодів ATHLET-CD та COCOSYS (розроблених німецькою компанією Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit).

Код ATHLET призначений для моделювання теплогідрравлічних процесів у реакторній установці (РУ). Спеціалізована версія коду ATHLET-CD дозволяє моделювати процеси в РУ на стадії ВА до моменту відмови днища корпусу реактора. Код COCOSYS призначений для аналізу процесів у приміщеннях герметичної оболонки РУ. Поєднання кодів ATHLET-CD та COCOSYS дозволяє розглядати їх як альтернативу коду MELCOR. При тому існує два шляхи виконання аналізу, а саме: автономний (послідовний) розрахунок (передбачає виконання розрахунку кодом ATHLET-CD, визначення параметрів середовища, яке виходить за межі РУ, імплементацію отриманих даних у модель для коду COCOSYS та виконання розрахунку параметрів у СГО) та поєднаний розрахунок (передбачає паралельний розрахунок зв'язкою кодів ATHLET-CD та COCOSYS із обміном даними між кодами безпосередньо під час розрахунку).

Мета цієї статті – порівняти результати автономних та поєднаного розрахункових аналізів сценарію ВА із застосуванням кодів ATHLET-CD та COCOSYS і оцінити відмінності в поведінці основних параметрів, що супроводжують розвиток ВА.

Розрахунковий аналіз проведено із застосуванням моделей енергоблока № 1 РАЕС для кодів ATHLET-CD 3.1A (patch 4) та COCOSYS 2.4 (v5), як таких, що відповідають найновішим версіям відповідних кодів, наявних у ДНТЦ ЯРБ. Як вихідну подію розглянуто течу першого контуру Ду 200 мм з накладанням повного знеструмлення енергоблока, яка призводить до швидкого пошкодження палива в активній зоні (а.з.) реактора.

Стислий опис розрахункової моделі енергоблока № 1 РАЕС (ВВЕР-440/В-213) для коду ATHLET-CD 3.1A

Розрахункова модель для коду ATHLET-CD 3.1A складається із термогідрравлічних об'ємів (ТГО) та теплових структур (ТС). До моделі першого контуру РУ ВВЕР-440/В-213 входять реактор, шість петель головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ), парогенератор (ПГ) та компенсатор тиску (КТ). До моделі другого контуру входять ПГ та паропроводи, головний паровий колектор, пароскидні пристрої, система підживлення ПГ. Допоміжні системи моделюються за допомогою елементів типу FILL. Зокрема, до них належать турбіна, система впорскування в КТ, підживлення-продування, запобіжні клапани (ЗК) ПГ, система підживлення ПГ, система аварійного охолодження а.з. (САОЗ) високого та низького тиску. Елементи, що моделюють ЗК КТ та швидкодіючу редуційну установку скидання пари в атмосферу (ШРУ-А), підключаються до об'єму з постійними граничними умовами.

Для виконання аналізу існуючу модель енергоблока № 1 РАЕС для коду ATHLET 3.1 було доповнено модулем для аналізу важкого пошкодження а.з. (ECORE) та додатковими супровідними модулями і в такий спосіб адаптовано до використання спеціалізованої версії коду ATHLET-CD 3.1A [5], яка дозволяє проводити аналіз ВА.

Опускна ділянка моделі реактора розділена на 6 секторів (по одному для кожної петлі ГЦТ), кожен з яких складається з двох ТГО. Нижня камера змішування реактора моделюється за допомогою п'яти ТГО. Верхня камера змішування реактора також моделюється п'ятьма ТГО. Область паливних касет моделюються чотирма симетричними радіальними кільцями з аксіальним розподілом на контрольні об'єми. Також модель містить ТГО касет системи контролю та управління реактором і байпас активної зони. Шість петель ГЦТ представлено шістьма петлями моделі. Головні циркуляційні насоси (ГЦН) моделюються за допомогою спеціальної вбудованої моделі насосів. Нодалізаційна схема реактора та циркуляційної петлі № 2 наведена на Рисунку 1.

КТ моделюється одним ТГО, для якого активовано функцію відстежування рівня пароводя-

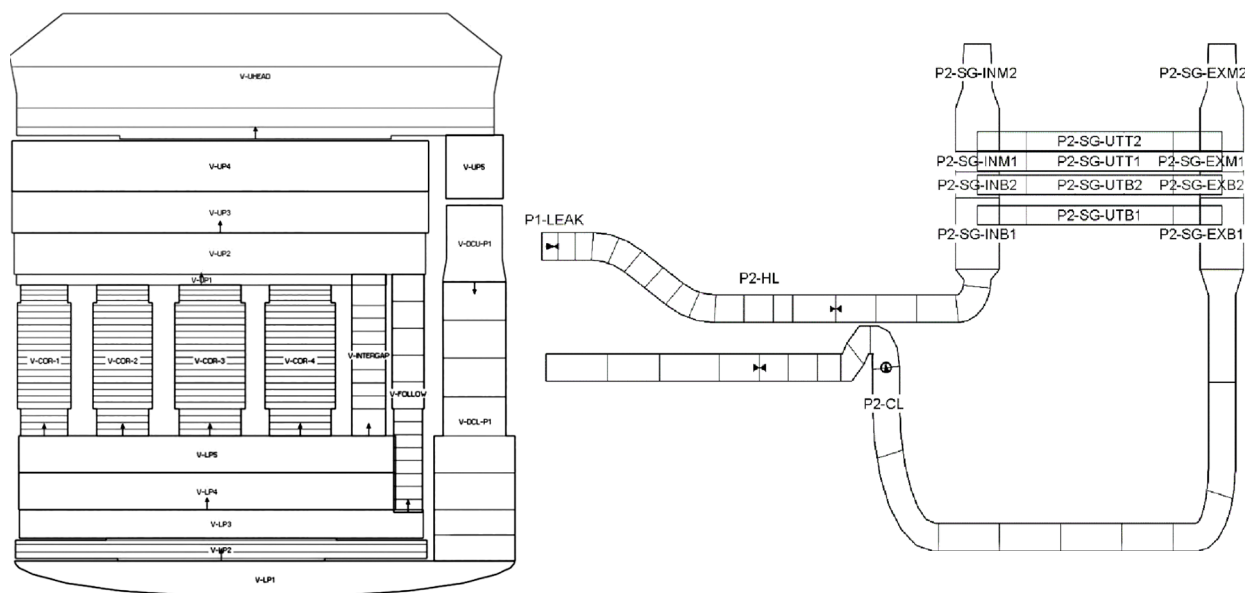


Рисунок 1 – Нодалізаційна схема реактора та циркуляційної петлі № 2

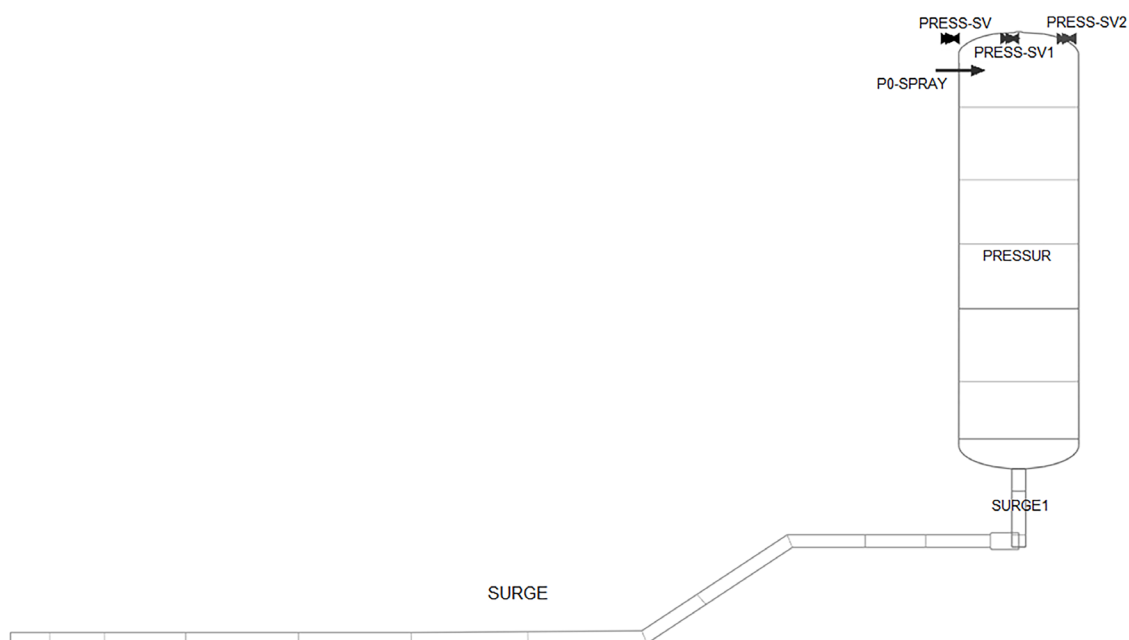


Рисунок 2 – Нодалізаційна схема системи компенсації тиску

ної суміші. Дихальні трубопроводи КТ моделюються одним трубопроводом з еквівалентними характеристиками. ЗК КТ під'єднані до верхньої парової частини КТ. Модель КТ також містить п'ять груп обігрівачів та систему впорскування. Нодалізаційна схема системи компенсації тиску наведена на Рисунок 2.

Перший контур ПГ моделюється дванадцятьма ТГО. Вісім ТГО являють собою гарячий та холодний колектори ПГ, а чотири ТГО моделюють теплообмінну поверхню ПГ, яка розділена на чотири вертикальних шари (Рисунок 1). Другий контур ПГ моделюється п'ятьма ТГО (Рисунок 3). Верхній паровий об'єм моделюється одним ТГО, область

трубчаткі ПГ моделюється трьома вертикальними ТГО з поперечними перетоками для організації циркуляції котлової води. Об'єм ПГ нижче трубчаткі представлено одним ТГО. Теплопередача між ТГО першого та другого контуру моделюється відповідними ТС, які представляють поверхню пучка труб ПГ.

Чотири гідроємності (ГЄ) CAO3 моделюються чотирма ТГО. Під час моделювання ГЄ CAO3 застосовано вбудовану в код модель ГЄ, тобто неоднорідний контрольний об'єм з межею між рідиною та азотом. Азот моделюється як ідеальний газ.

Модель течі – одномірна, моделюється на гарячій нитці петлі № 2 ГЦТ на виході з реактора. Скидання

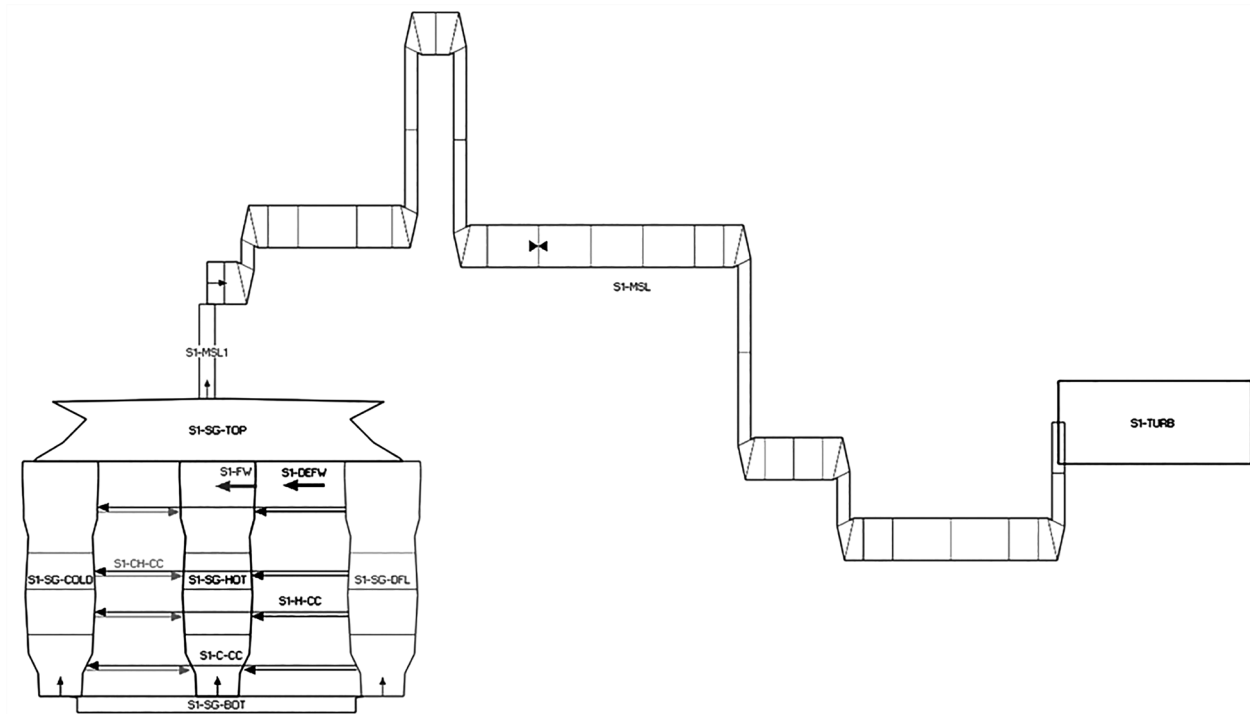


Рисунок 3 – Нодалізаційна схема другого контуру ПГ та паропроводу

середовища першого контуру відбувається у відсік ПГ (об'єм SGBOX1A моделі COCOSYS). Функціонування автоматичного регулятора потужності реактора (АРП), пристрою обмеження потужності (РОП), аварійного захисту та інших систем контролю та управління, а також постульованих дій оператора моделюються за допомогою блока GCSM.

Для виконання поєданого розрахунку кодами ATHLET-CD та COCOSYS (моделювання з використанням «зв'язки» кодів, де обмін даними відбувається між паралельними розрахунковими процесами) основні зміни вносяться в розрахункову модель РУ. Зокрема, у вхідному файлі моделі коду ATHLET-CD зазначається ТГО, через який відбувається витікання середовища з РУ, та відповідний «приймаючий» елемент СГО моделі COCOSYS. Також у моделі РУ наводиться перелік всіх ТС, що межують з приміщеннями СГО, та конкретизується їх розташування. Отже, під час застосування «зв'язки» кодів враховується розігрів середовища СГО відповідними ТС моделі РУ, що покращує точність та реалістичність розрахунку.

Додаткові модулі коду ATHLET-CD 3.1A, які були впроваджені для аналізу ВА

Для аналізу ВА модель енергоблока № 1 ПАЕС для коду ATHLET-CD 3.1A було доповнено такими модулями:

ECORE – основний модуль, призначений для моделювання розігріву та окислення оболонок твел, а також процесів деградації а.з. Під час вико-

нання дослідження базову (двоканальну) модель а.з. було замінено на чотириохкільцеву модель із покращеною деталізацією елементів;

SOPHAEROS – модуль, призначений для аналізу процесів перенесення і осадження радіонуклідів у першому контурі РУ під час аварії з важким пошкодженням а.з. Вхідними даними для зазначеного модуля коду ATHLET-CD є параметри ТГО, температури поверхонь ТС, кількість вивільнених продуктів поділу та аерозолів. Окремо зауважимо, що версія коду ATHLET-CD 3.1A має обмеження в частині можливості визначення лише одного шляху виходу та осідання радіонуклідів, що було враховано під час вибору розрахункового сценарію;

FIPREM – модуль, який визначає вихід продуктів ділення та аерозолів з твел. Зазначений модуль базується на інтегральному підході до визначення кількості вивільнених радіонуклідів. Під час розрахунку кількості вивільнених нуклідів враховується вплив температури елементів та склад матеріалів а.з.;

OREST – модуль, призначений для розрахунку стаціонарного нуклідного складу в паливі з використанням розрахункових даних, вбудованих в ATHLET-CD;

FIPISO – модуль, призначений для аналізу поведінки визначеного набору ізотопів у першому контурі в перехідних процесах. Модуль FIPISO дозволяє визначити масу, потужність і активність радіонуклідів та їх винесення за межі першого контуру. Отримані в модулі FIPISO дані використовуються модулем SOPHAEROS;

AIDA – модуль, призначений для аналізу теплової поведінки розплаву а.з. після його пере-

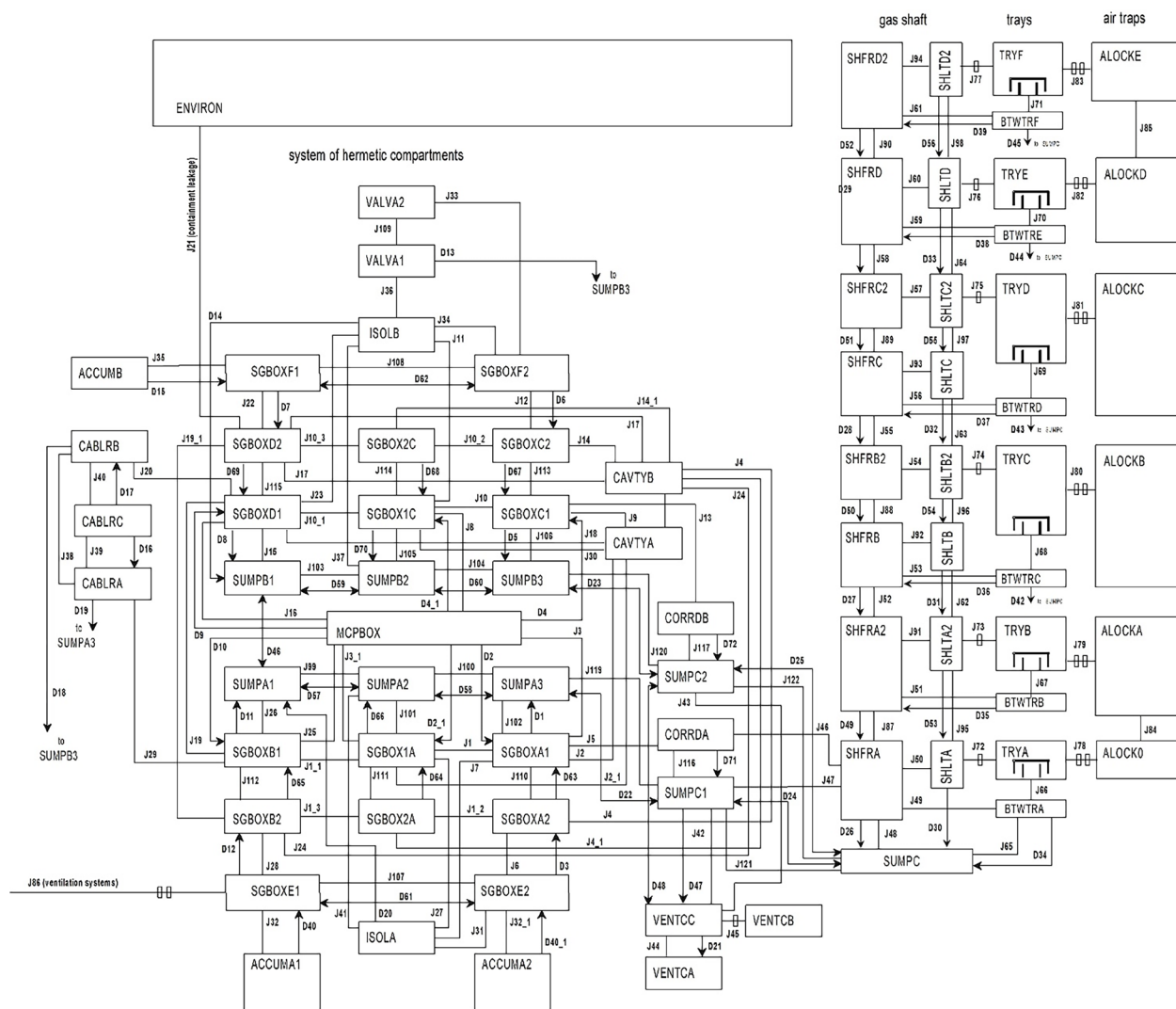


Рисунок 4 – Нодалізаційна схема моделі СГО ПАЕС-1 для коду COCOSYS

міщення на днище реактора та для структурного аналізу корпусу реактора. Враховуючи, що модуль AIDA містить в собі лише сферичну геометрію днища, для забезпечення умовної застосовності результатів розрахунків для корпусу ВВЕР-440, який має еліптичну форму днища, геометричні характеристики сферичної моделі днища в модулі AIDA були змінені так, щоб площа сферичного днища моделі відповідала площі еліптичного днища корпусу реактора ВВЕР-440/В-213.

Стислий опис розрахункової моделі енергоблока № 1 ПАЕС (ВВЕР-440/В-213) для коду COCOSYS

Автономні та поєднані розрахунки параметрів у СГО були проведені за допомогою комп'ютерного коду COCOSYS 2.4 (v5) із застосуванням аналітичної моделі енергоблока № 1 ПАЕС з РУ ВВЕР-440/В-213. Для цілей цього дослідження існуюча модель для коду COCOSYS була модифікована та оновлена до останньої версії

COCOSYS V2.4v5. Також модель була змінена з урахуванням специфіки обраного сценарію (теча першого контуру Ду 200 мм з повним знеструмленням енергоблока). Основні модифікації були пов'язані з більш детальним моделюванням приміщень ПГ, оскільки базова модель передбачала розподіл приміщень ПГ та ГЦТ на чотири ноди (розрахункові об'єми), що не дозволяло провести коректне поєднання з шестипетлевою моделлю РУ коду ATHLET-CD.

Застосована модель для коду COCOSYS складається з 78 нодів, 216 з'єднань (із яких 133 – атмосферні, 72 – дренажні та 11 – системні) та 185 ТС. Нодалізаційна схема моделі СГО ПАЕС-1 для коду COCOSYS наведена на Рисунок 4.

- Модель СГО ПАЕС-1 складається з:
- нодів системи герметичних приміщень;
- нодів системи пониження тиску в СГО (пасивний конденсатор та спринклер);
- нодів системи «повітряних пасток».

Система пасивного конденсатора (ПК) моделюється 35 нодами. 16 нодів, які утворюють

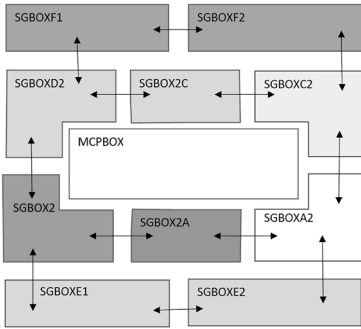


Рисунок 5 – Схема перерозподілу та відносного розташування приміщень ПГ та ГЦТ моделі

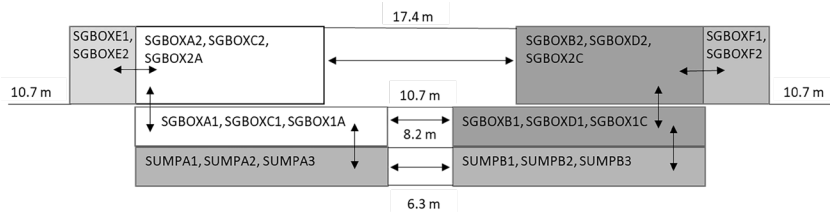


Рисунок 6 – Схема вертикального розподілу приміщень ПГ та ГЦТ моделі

8 аксіальних шарів, моделюють простір попереду та з боків водовмісних тарілок, 6 нодів моделюють безпосередньо 12 тарілок ПК, 6 нодів моделюють об'єми нижче тарілок, один нод моделює прямокутну повітряну шахту, 6 нодів моделюють «повітряні пастки». «Повітряні пастки» відокремлені від сусідніх тарілок для води зворотними клапанами Ду 500 мм. Навколишнє середовище моделюється одним нодом. Модель для коду COCOSYS містить активну та пасивну спринклерні системи. Однак, унаслідок обраного сценарію з повним знеструмленням енергоблока, робота активної спринклерної системи не розглядалась.

Для цілей цього аналізу, а також з метою відображення реальної геометрії та розташування відповідних приміщень СГО (A201/V5-V6, A302 та A306) ноди, що моделюють приміщення ПГ та ГЦТ, були перерозподілені та додатково розділені на 3 яруси за висотою. Загальний підхід до моделювання приміщень ПГ наведено на Рисунках 5 та 6.

Стіни, стеля, підлога та внутрішні компоненти приміщень подано у моделі 185 ТС. Передача тепла до конструкцій та стін, теплопровідність у конструкційних матеріалах та профілі температури стін розраховуються в коді COCOSYS для забезпечення коректності балансів поглинання та виділення енергії ТС.

Розрахункова модель для коду COCOSYS також містить пасивні автокаталітичні рекомбінатори (ПАР) водню для попередження утворення небезпечних концентрацій водню (H₂) та монооксиду вуглецю (CO). Застосований тип ПАР – FR 90/1-1500, що відповідає встановленому на РАЕС-1 типу обладнання.

Застосована модель для коду COCOSYS дозволяє проаналізувати поведінку аерозолів та продуктів поділу, які виносяться в СГО на фазі ВА. Для виконання аналізу ВА в моделі було активовано відповідний модуль AFP.

Для застосування «зв'язки» кодів ATHLET-CD та COCOSYS у розрахункову модель СГО вносяться незначні зміни, які полягають в активації

функції поєднаного розрахунку та впровадженні в модель СГО спеціального запису із назвами моделі РУ та виконаного файлу ATHLET-CD.

Результати порівняльних розрахунків ВА з течею першого контуру Ду 200 мм та повним знеструмленням енергоблока

Початкові умови визначають значення параметрів у РУ та СГО, які відповідають початковому стану АЕС на момент виникнення вихідної події (ВП). Основні припущення щодо стану РУ стисло наведено нижче [6, п. 4.1.15]:

реактор працює на 100 % номінальної потужності (цю величину було обрано на основі попередніх розрахунків, які показали, що підвищення потужності понад 100 % у модулі ECORE в окремих випадках може призводити до зупинки розрахунку);

витрата через реактор приймається мінімальною, що забезпечує максимальну питому енергію, накопичену в теплоносії на момент виникнення ВП;

тиск у першому контурі приймається максимальним, що забезпечує більшу початкову витрату теплоносія в течу;

тиск у ПГ приймається максимальним, що забезпечує вищу середню температуру теплоносія першого контуру;

рівень у КТ приймається мінімальним, що забезпечує менший запас теплоносія в першому контурі та швидше пошкодження а.з.

Початкові параметри в СГО ґрунтуються на виміряних на АЕС даних та складають:

тиск в приміщеннях барботажної системи (абс.) – 98,9 кПа;

тиск у «повітряних пастках» (абс.) – 100 кПа;

температура в приміщеннях СГО – 31 – 51 °С;

температура в приміщеннях барботажної системи – 37 °С;

температура в «повітряних пастках» – 35 °С;

вологість в приміщеннях СГО – 50 %;

рівень води в барботажній системі – 512 мм.

Граничними умовами розрахунку були прийняті такі припущення:

теча першого контуру Ду 200 мм виникає на гарячій нитці петлі № 2 ГЦТ на виході з реактора. Таке розміщення течі відповідає приміщенню SGBOX1A моделі COCOSYS;

дії оперативного персоналу не враховуються;

передбачається, що одна з ГЕ CAO3 не подаватиме воду в перший контур через відмову засувки на лінії підключення до реактора, а витрата іншої зразу виноситься в течу. За таких умов підживлення першого контуру буде відбуватися лише від двох ГЕ CAO3. Таке припущення забезпечує більш раннє пошкодження палива в а.з.;

основні параметри РУ (такі як потужність реактора, тиск в першому та другому контурах, рівні в КТ та ПГ) підтримуються автоматично відповідними регуляторами;

унаслідок виникнення ВП активні системи безпеки (CAO3 високого та низького тиску, а також спринклерна система) перебувають у непрацездатному стані.

Опис перехідного процесу, спричиненого течєю першого контуру Ду 200 мм з повним знеструмленням енергоблока № 1 РАЕС (втрата зовнішнього та внутрішнього електропостачання з одночасною відмовою дизель-генераторів (ДГ) системи аварійного електропостачання), наведено нижче.

Виникнення течі першого контуру Ду 200 мм на гарячій нитці петлі № 2 (на виході з реактора) моделі ATHLET-CD з накладанням повного знеструмлення енергоблока спричиняє стрімке зниження тиску першого контуру (Рисунок 7) внаслідок втрати теплоносія в приміщення SGBOX1A моделі COCOSYS з початковою витратою близько 3600 кг/с (Рисунки 9 та 10). Втрата всіх джерел електропостачання з незапуском ДГ (постульована подія) призводить до відключення ГЦН та електронагрівачів (ТЕН) КТ, живильних електронасосів (ЖЕН) системи підживлення ПГ та припинення роботи системи підживлення-продування.

Формування аварійного захисту реактора консервативно прийнято за сигналом вимкнення чотирьох із шести ГЦН із затримкою 3 с після знеструмлення, що забезпечує більш раннє спустошення ПГ та швидший розігрів а.з. Закриття спорних клапанів турбогенератора (СК ТГ) через втрату вакууму в конденсаторах постулюється на 5 с перехідного процесу.

За фактом зниження тиску першого контуру до 60 кгс/см² ГЕ CAO3 починають подавати розчин борної кислоти в перший контур. Максимальний тиск у головному паровому колекторі ~53 кгс/см² був досягнутий на 28 с та 26 с перехідного процесу в автономному та поєднаному розрахунках відповідно. Підтримання тиску другого контуру забезпечується ШРУ-А.

Втрата теплоносія в течу призводить не лише до швидкого зниження тиску першого контуру та втрати рівня в КТ, але і до підвищення параметрів у СГО. Максимальний тиск у приміщенні з течєю (SGBOX1A) був досягнутий на 145 с перехідного процесу в автономному та поєднаному розрахунках (Рисунок 13). На 157 с ГЕ-2,4 CAO3 спустошуються і підживлення першого контуру припиняється.

Подальша втрата теплоносія в течу призводить до зниження рівня в реакторі та початку інтенсивного розігріву оболонок на 792 с та 787 с автономного та поєднаного розрахунків відповідно. Критерій початку переміщення розплаву з а.з. на днище корпусу було досягнуто на 4412 с та 4307 с автономного та поєднаного розрахунків відповідно. Після переміщення розплаву відбувається википання залишків теплоносія в нижній камері реактора.

Після деградації а.з. розпочинається виніс продуктів поділу за межі першого контуру в приміщення SGBOX1A моделі COCOSYS та подальше їх розповсюдження по СГО. Розрахунок було зупинено в момент порушення цілісності днища корпусу реактора.

Хронологія подій у сценарії, що досліджувався, наведена в Таблиці 1 нижче. Основні графічні результати аналізу наведено на Рисунках 7-18 нижче.

Таблиця 1 – Хронологія подій у сценарії ВА з течєю першого контуру Ду 200 мм та повним знеструмленням енергоблока

Час, с		Подія
Автономний розрахунок	Поєднаний розрахунок	
0,0	0,0	Виникнення течі з гарячої нитки петлі № 2 ГЦТ на виході з реактора. Втрата всіх джерел електропостачання з незапуском ДГ (постульована подія). Відключення ГЦН, ТЕН КТ, ЖЕН та припинення роботи системи підживлення продування.
2,3	2,3	Формування сигналу на запуск ДГ (з витримкою 2 с та затримкою 0,3 с на проходженні сигналу в електричних мережах).

Час, с		Подія
Автономний розрахунок	Поєднаний розрахунок	
3,0	3,0	Формування сигналу АЗ-1 унаслідок відключення 4 з 6 ГЦН із затримкою 3 с. Формування сигналу АЗ-1 за фактом знеструмлення консервативно не враховується.
5,0	5,0	Закриття СК ТГ унаслідок втрати вакууму в конденсаторах ТГ (постульована подія).
20	20	Початок подачі розчину борної кислоти в перший контур від ГЕ САОЗ (після зниження тиску в першому контурі до 60 кгс/см ²).
28	26	Максимальний тиск в ГПК: автономний розрахунок – 52,9 кгс/см ² (установка відкриття ШРУ-А не досягнута); поєднаний розрахунок – 53,1 кгс/см ² (відкриття ШРУ-А після підвищення тиску до 52 ⁺¹ кгс/см ²). Точність визначення параметру була врахована для накопичення більшої енергії в першому контурі та швидшого пошкодження а.з.
145	145	Максимальний тиск в приміщенні з течею (SGBOX1A): автономний розрахунок – 165,9 кПа; поєднаний розрахунок – 166,1 кПа.
157	157	Спустошення ГЕ-2,4 САОЗ.
792	787	Початок інтенсивного розігріву оболонок твел.
4412	4307	Початок переміщення розплаву на днище корпусу реактора.
8540	7600	Максимальна температура в приміщенні з течею (SGBOX1A): автономний розрахунок – 204°C; поєднаний розрахунок – 232°C.
20616	20192	Кінець розрахунку внаслідок руйнування днища корпусу реактора.

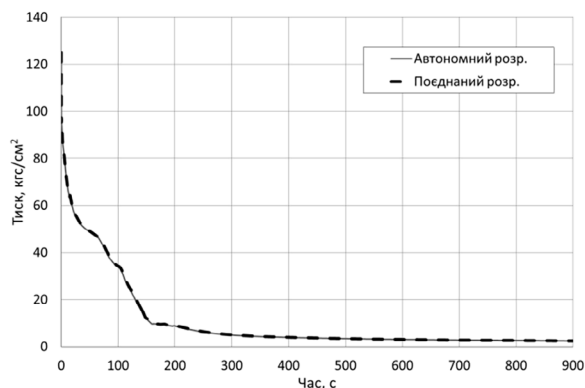


Рисунок 7 – Тиск в першому контурі (фрагмент 0-900 с)

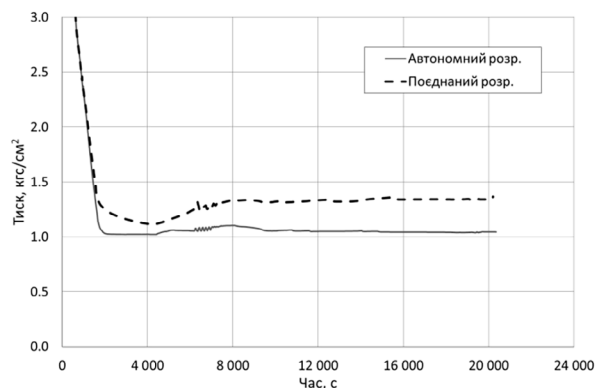


Рисунок 8 – Тиск в першому контурі (фрагмент 0-3 кгс/см²)

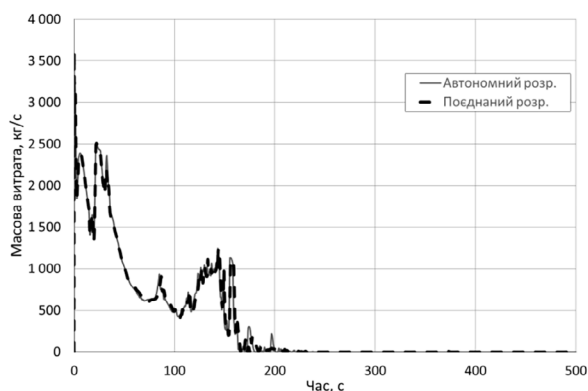


Рисунок 9 – Масова витрата води в течу (фрагмент 0-500 с)

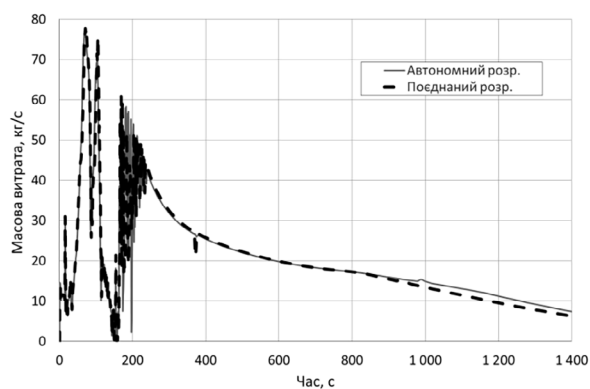


Рисунок 10 – Масова витрата пари в течу (фрагмент 0-1000 с)

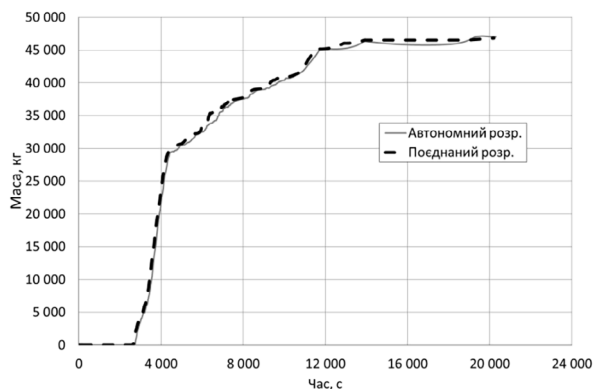


Рисунок 11 – Маса розплавлених в а.з. матеріалів

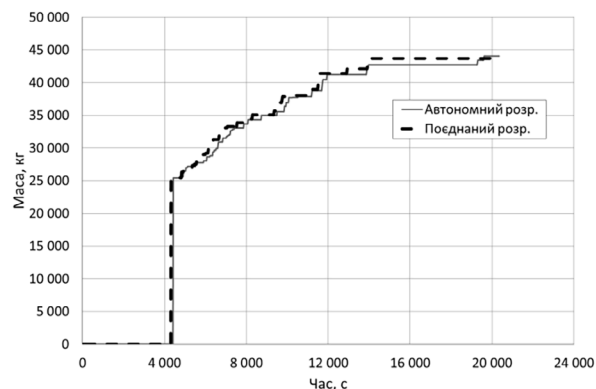


Рисунок 12 – Загальна маса розплавлених матеріалів, що перемістились до дна корпусу реактора

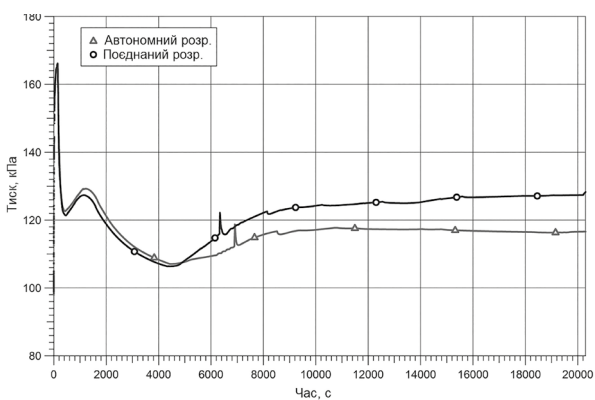


Рисунок 13 – Тиск в приміщенні з течею (SGBOX1A)



Рисунок 14 – Температура в приміщенні з течею (SGBOX1A)

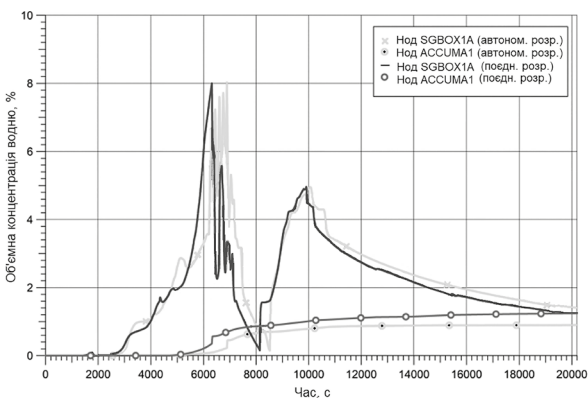


Рисунок 15 – Концентрація водню в нодах СГО (SGBOX1A, ACCUMA1)

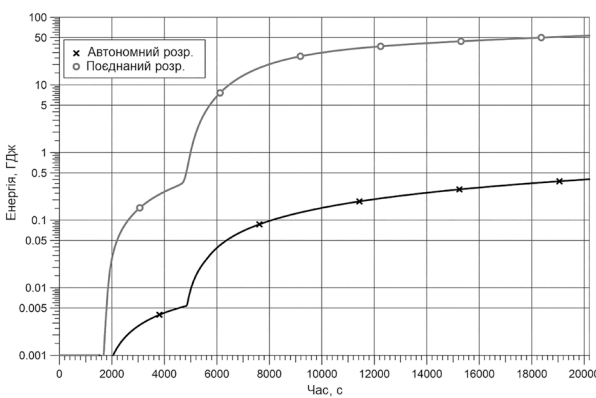


Рисунок 16 – Сумарна потужність залишкових енерговиділень, що виділяються в СГО

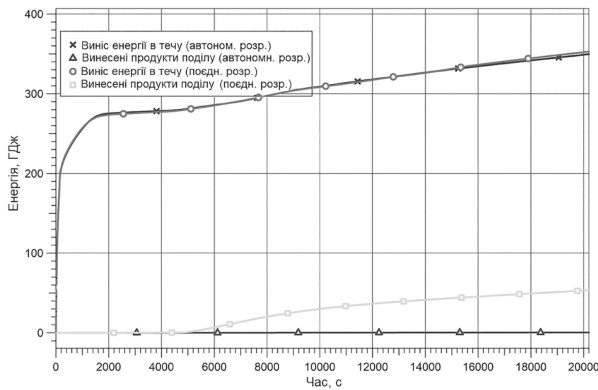


Рисунок 17 – Значення енергії, які передаються з моделі ATHLET-CD в модель COCOSYS

За результатами проведеного аналізу було встановлено, що енергія, яка передається з моделі РУ (код ATHLET-CD) до моделі СГО (код COCOSYS) через винесення води та пари, є майже ідентичною в автономному та поєднаному розрахунках (Рисунок 17). Водночас потужність залишкових енерговиділень вивільнених у СГО продуктів поділу (Рисунок 17) та інтегральна маса аерозолів (Рисунок 18) суттєво більша в поєднаному розрахунку. Зазначене пояснюється тим, що під час виконання автономних розрахунків користувачем за результатами розрахунку кодом ATHLET-CD визначаються основні елементи (продукти поділу) та вручну вносяться у модель для коду COCOSYS як джерела енерговиділення, що залежать від часу розрахунку. Це призводить до неврахування деякої кількості неосновних продуктів поділу, які поодиночки не впливають на протікання аналізу, однак у сукупності можуть спричинити помітний вплив на його результати.

Під час дослідження встановлено, що на ранній фазі аварії різниця в зміні параметрів у РУ та СГО для автономних і поєданого розрахунків є незначною. Виявлені відмінності можуть пояснюватися наявною незначною різницею в масових витратах води та пари з розриву (через змінний протитиск середовища СГО у поєданому розрахунку), а також через присутню в поєданому розрахунку теплопередачу від теплових структур першого контуру до атмосфери приміщень СГО. Водночас на середній і пізній фазі ВА різниця в енерговиділеннях продуктів поділу та кількості аерозолів, винесених у приміщення СГО, в автономних і поєданому розрахунках призводить до отримання дещо різних результатів аналізу. Зокрема, в поєданому розрахунку, де відбувається постійний обмін даними між двома кодами, на середній та пізній фазі аварії досягаються вищі тиск (Рисунок 13) і температура (Рисунок 14) у приміщеннях СГО, що забезпечується більш точною передачею даних між кодами.

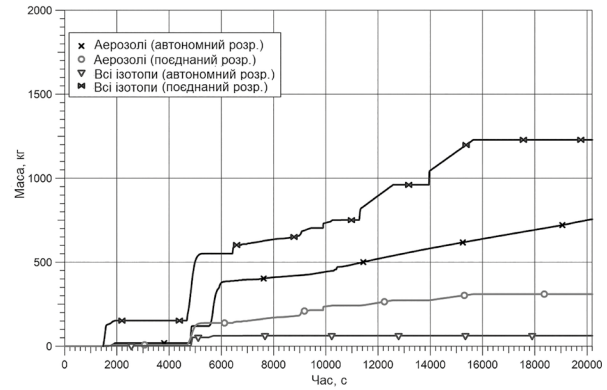


Рисунок 18 – Інтегральна маса продуктів поділу в СГО

Висновки

У статті наведено стислий опис проведених модифікацій розрахункових моделей енергоблока № 1 ПАЕС (ВВЕР-440/В213) для кодів ATHLET-CD 3.1A (модель РУ) та COCOSYS 2.4v5 (модель СГО), а також представлено результати автономних та поєднаних розрахунків аварії з течєю теплоносія Ду 200 мм і повним знеструмленням енергоблока № 1 ПАЕС.

Аналіз отриманих результатів розрахунків вказує на майже однакову поведінку основних параметрів у РУ та СГО на початкових етапах аварії. Деякі незначні відмінності виникають через наявність мінімальної різниці в масових витратах води та пари з розриву, а також через присутню в поєданому розрахунку теплопередачу від теплових структур першого контуру РУ до атмосфери приміщень СГО. Водночас впродовж середньої та пізньої фаз аварії виникають більш значні відмінності, спричинені різною кількістю винесених у СГО продуктів поділу та аерозолів. Виявлені відмінності як на ранній, так і пізній стадії аварії загалом спричинені більшою точністю поєданого розрахунку порівняно з автономним (в якому не враховується теплопередачу від обладнання РУ до приміщень СГО, а кількість винесених в СГО продуктів поділу та аерозолів залежить від підготовки даних користувачем). Зазначене дозволяє рекомендувати до застосування саме «зв'язку» кодів/моделей ATHLET-CD та COCOSYS для проведення чисельного аналізу важких аварій у РУ та СГО.

Список використаної літератури

1. SSR-2/1 (Rev. 1). Safety of nuclear power plants: design. IAEA safety standards series. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2016. 71 p.

2. WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors. Report. Update in Relation To Lessons Learned From TEPCO Fukushima Daiichi Accident. 24th September 2014. 13 p.

3. Council Directive 2014/87/EURATOM of 8 July 2014 amending Directive 2009/71/Euratom establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations.

4. Коцуба О. Л., Воробйов Ю. Ю., Жабін О. І., Гуменюк Д. В. Порівняльний аналіз розвитку важкої аварії на енергоблоці АЕС з реактором ВВЕР 1000 з використанням версій коду MELCOR 1.8.5 та 2.1. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 1(85). С. 29-39. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).03.

5. H. Austregesilo, C. Bals, T. Hollands, C. Köllein, W. Luther, J.-D. Schubert, K. Trambauer, S. Weber. GRS. ATHLET-CD Mod 3.1 Cycle A. User's Manual. GRS-P-4/Vol. 1. July 2016. 172 p.

6. 1-P-PAEC. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока № 1 PAЭС.

References

1. IAEA Safety Standards Series SSR-2/1 (Rev. 1). Safety of nuclear power plants: design. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2016, 71 p.

2. WENRA safety reference levels for existing reactors. Report. Update in relation to lessons learned from TEPCO Fukushima Daiichi accident. 24th September 2014, 13 p.

3. Council Directive 2014/87/EURATOM of 8 July 2014 amending Directive 2009/71/Euratom establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations.

4. Kotsuba, O., Vorobyov, Yu., Zhabin, O., Gumenyuk, D. (2020). Comparative analysis of severe accident at WWER-1000 NPP with MELCOR 1.8.5 and 2.1 code versions. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(85), 29-39. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).03.

5. Austregesilo, H., Bals, C., Hollands, T., Köllein, C., Luther, W., Schubert, J.-D., Trambauer, K., Weber, S. (2016). GRS. ATHLET-CD Mod 3.1 Cycle A. User's Manual. GRS-P-4/Vol. 1, 172 p.

6. Technical specifications of RNPP-1 safe operation. 1-R-RNPP.

accident scenario for Rivne Nuclear Power Plant Unit 1 (WWER-440/V-213) with application of ATHLET-CD 3.1A and COCOSYS 2.4 codes are presented in the paper.

ATHLET-CD stand-alone calculation was performed with constant containment pressure (a time dependent volume with constant pressure and temperature was used as a boundary volume for leakage). Further, mass and energy release and fission products from the primary system obtained during ATHLET-CD stand-alone calculation were used to perform COCOSYS stand-alone calculation. In addition, coupled ATHLET-CD and COCOSYS calculation was performed. All the computer analyzes were performed until the lower head failure. ATHLET-CD model was extended with core degradation module (ECORE), which allowed calculation of scenario until reactor pressure vessel failure.

According to the results of comparative analysis, nearly the same behavior of the main parameters in the stand-alone and coupled calculation at an early phase of scenario was obtained. Some small differences occur due to distinction in behavior of water and steam mass flows released through the break and due to existence of heat transfer from the primary system structures to the containment compartments during coupled calculation of transient. As for middle and late phases of the accident, some differences between stand-alone and coupled calculation results for analyzed scenario are present. These differences are caused by different total fission products and aerosols release from the reactor coolant system to the containment compartments. The above information allows recommending application of coupled code/model versions for performing the computer severe accident analyses.

Keywords: severe accident, WWER-440, computer model, ATHLET-CD, COCOSYS.

Analysis of Processes in the Containment Using ATHLET-CD and COCOSYS Codes

Vyshemirskiy M.¹, Pustovit V.¹, Kravchenko V.², Donskiy D.¹

¹State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, Ukraine

²Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

A brief description of performed input deck modifications and results of stand-alone and coupled calculations of Dn 200 mm loss of coolant accident with simultaneous total station blackout

Отримано 18.05.2020.