

## Особливості управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий з використанням регулюючого клапана на напорі САОЗ ВТ

*Проаналізовано особливості протікання аварії з течею теплоносія з першого контуру в другий з можливістю управління витратою на напорі системи аварійного охолодження активної зони реакторної установки з насосами високого тиску (САОЗ ВТ) за допомогою регулюючого клапана (РК) порівняно з роботою САОЗ ВТ без РК у рамках оновленої стратегії з ліквідації аварії. Досліджувалося протікання аварії без відмов обладнання, а також з відмовою арматури системи аварійного газовидалення у повністю відкритому положенні. За результатами розрахунків автоматизована робота РК дає змогу зменшити інтегральну витрату в течу та забезпечити підтримання необхідного запасу до насичення в першому контурі, проте супроводжується явищем автоколивань.*

*Ключові слова:* теча теплоносія з першого контуру в другий, регулюючий клапан, САОЗ ВТ.

**А. В. Носовский, А. В. Гурьев, Р. И. Серафин, О. В. Иванюк**

### Особенности управления аварией с течью из первого контура во второй с использованием регулирующего клапана на напоре САОЗ ВД

*Проанализированы особенности протекания аварии с течью теплоносителя из первого контура во второй с возможностью управления расходом на напоре системы аварийного охлаждения активной зоны реакторной установки с насосами высокого давления (САОЗ ВД) с помощью регулирующего клапана (РК) по сравнению с работой САОЗ ВД без РК в рамках обновленной стратегии по ликвидации аварии. Исследовано протекание аварии без отказов оборудования, а также с отказом арматуры системы аварийного газоудаления в полностью открытом положении. Согласно результатам расчетов, автоматизированная работа РК позволяет уменьшить интегральный расход в течу и обеспечить поддержание необходимого запаса до насыщения в первом контуре, однако сопровождается явлением автоколебаний.*

*Ключевые слова:* течь теплоносителя из первого контура во второй, регулирующий клапан, САОЗ ВД.

**Н**а цей час на енергоблоках АЕС України впроваджується низка модернізацій, спрямованих на оптимізацію управління аварійними процесами з втратою теплоносія першого контуру [1]. До них належить встановлення на напорі насосів САОЗ ВТ регулюючого клапана (РК) для забезпечення управління витратою на перший контур (енергоблоки №№ 1, 2 Рівненської АЕС та №№ 1, 2 Южно-Української АЕС).

У процесі такої модернізації основну увагу зосереджено на підвищенні безпеки реакторної установки в разі теч теплоносія першого контуру, тоді як можливість оптимізації управління аварією з течею з першого контуру в другий детально не розглянута і, в основному, реалізується в рамках модернізації з впровадження автоматизованого алгоритму управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий.

Формально течі теплоносія з першого контуру в другий є окремим випадком теч першого контуру. Але на відміну від останніх, течі теплоносія з першого контуру в другий мають деякі особливості, які потребують використання спеціальних стратегій управління цими аваріями. По-перше, в разі теч теплоносія з першого контуру в другий відбувається незворотна втрата теплоносія першого контуру. По-друге, крім небезпеки пошкодження активної зони, виникає загроза викиду радіоактивного теплоносія першого контуру в атмосферу (байпас герметичного огороження) через пароскидні пристрої аварійного парогенератора (ПГ).

Наведені особливості накладають на процес управління течами з першого контуру в другий низку обмежень, зокрема щодо підживлення першого контуру від системи САОЗ ВТ.

Таким чином, одним з основних завдань управління течами теплоносія з першого контуру в другий є встановлення такого підживлення першого контуру, яке забезпечить відновлення втрати теплоносія першого контуру і водночас не призведе до викиду в атмосферу, а також дасть змогу максимально швидко зрівноважити тиски в першому та другому контурах для припинення течі.

У зв'язку із швидким протіканням перехідного процесу в разі теч теплоносія з першого контуру в другий (у діапазоні від Ду 40 до Ду 100 мм), а також через високий рівень стресу та інформаційного навантаження на персонал (необхідність контролю тисків першого контуру, аварійного та неаварійних ПГ, рівня в компенсаторі тиску, запасу до насичення першого контуру, витрати від САОЗ ВТ тощо) під час ліквідації цієї аварії, регулювання витратою на напорі САОЗ ВТ оператором є складним завданням, виконання якого може з високою ймовірністю призвести до помилки персоналу. Реалізація автоматизованого управління витратою на напорі САОЗ ВТ дасть змогу мінімізувати вплив людського фактора, а отже, зменшити ймовірність виникнення негативних наслідків ліквідації течі теплоносія з першого контуру в другий.

Основною метою цієї статті є аналіз управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий з використанням РК на напорі САОЗ ВТ, оцінка недоліків та переваг використання РК.

У статті наведено результати порівняльних розрахунків інтегральної витрати для різних діаметрів течі з використанням та без використання РК САОЗ ВТ, а також результати розрахункових аналізів аварії з течею теплоносія з першого контуру в другий Ду 40 мм у разі протікання аварії без накладання додаткових відмов та в разі відмови САГ на закриття в максимально відкритому положенні.

**Основні підходи до виконання аналізу.** Під час чергового перегляду інструкцій з ліквідації аварій на енергоблоках АЕС України державним підприємством «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» (ДП НАЕК «Енергоатом») проведено додаткові аналізи вихідних подій, пов'язаних з течею першого контуру в другий, з урахуванням набутого в галузі досвіду. Одним з результатів виконаних ДП НАЕК «Енергоатом» робіт стала оновлена стратегія з управління зазначеною аварією, яка забезпечує зменшення інтегральної витрати в течу, а також мінімізацію спрацювання пароскидних пристроїв аварійного ПГ.

Для виконання описаних далі аналізів модифіковано теплогідрравлічну модель реакторної установки В-320 розрахункового коду RELAP5/MOD 3.2 [2]. За основу взято оновлену стратегію управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий, впроваджену на енергоблоці № 3 Южно-Української АЕС (без РК з ручним управлінням САОЗ ВТ в режимі підтримання запасу до насичення першого контуру).

Оновлена стратегія має низку особливостей, які враховано в процесі моделювання дій персоналу в моделі [2].

У рамках оновленої стратегії реалізовано прискорений перехід з діагностичної процедури симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій (СОАІ) А-0 «Срабатывание аварийной защиты реактора или запуск систем безопасности» до процедури оптимального відновлення А-3 «Течь 1-го контура во 2-й контур». Прискорений перехід враховано в моделі [2] реалізацією дій персоналу з припинення течі вже через 5 хв після початку аварії. Ці дії полягали в початковому зменшенні та подальшому підтриманні тиску в першому контурі в діапазоні 66–70 кгс/см<sup>2</sup> за рахунок роботи САГ, щоб запобігти або обмежити спрацювання пароскидних пристроїв аварійного ПГ.

Також у моделі [2] враховано передбачені стратегією дії з ізоляції паропроводів аварійного та неаварійних ПГ шляхом закриття швидкодіючих запірних відсічних клапанів, подальшого переведення швидкодіючих редуційних установок скидання пари в атмосферу неаварійних ПГ на знижені уставки та розхолодження (розглядався випадок з вимкненими головними циркуляційними насосами).

Окрім врахування дій персоналу, згідно з оновленою стратегією модель [2] модифіковано за допомогою моделювання РК на кожному каналі САОЗ ВТ. Передбачається, що РК на напорі САОЗ ВТ працює без втручання оператора, тобто всі дії щодо регулювання витратою від САОЗ ВТ відбуваються автоматично по уставках.

Для управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий змодельовано два режими роботи РК:

- 1) режим заповнення КТ;
- 2) режим підтримання запасу до насичення в першому контурі.

Відповідно, ліквідацію аварії можна поділити на два етапи (до та після відновлення рівня в КТ), на кожному з яких реалізується необхідний режим роботи РК САОЗ ВТ.

На першому етапі ліквідації аварії основна мета роботи РК — відновлення рівня в КТ. Для цього встановлюється мінімальна витрата від САОЗ ВТ, потрібна для заповнення КТ. Початкова ступінь відкриття РК САОЗ ВТ, визначена за результатами ітераційних розрахунків, дорівнює 15 %. Встановлення мінімальної витрати від САОЗ ВТ полягає в поступовому ступінчатому відкритті РК (на 1 % через кожні 15 с) з 15 % до моменту початку росту рівня в КТ. На другому етапі аварії, після досягнення в КТ рівня 8 м,

РК поступово закривається і, за потреби, відбувається переведення його роботи в режим підтримання необхідного запасу до насичення (15 °С) в першому контурі (розглядається мінімальний запас до насичення в гарячих нитках головного циркуляційного трубопроводу — ГЦТ). У цьому режимі РК починає поступово відкриватися, якщо запас до насичення в першому контурі досягнув 15 °С і продовжує знижуватися. Кожного разу після збільшення ступеня відкриття РК перевіряється достатність нового значення витрати. Якщо при значенні запасу до насичення в першому контурі менше 15 °С починається його зростання, то відкриття РК припиняється, в іншому разі — продовжується. Якщо запас до насичення в першому контурі досягає 15 °С і продовжує зростати, то РК починає поступово закриватися до моменту припинення зростання. Паралельно з цим персонал виконує розхолодження РУ та стабілізацію параметрів першого контуру.

У попередніх дослідженнях [3] робота РК САОЗ ВТ розглядалась після стабілізації параметрів першого контуру. Це пояснювалось тим, що робота регулятора в режимі підтримання запасу до насичення на початкових етапах аварії не тільки є неефективною, але й шкідливою, оскільки призводить до додаткових циклічних, динамічних та термічних навантажень [3]. Однак у запропонованій стратегії на початковому етапі аварії РК САОЗ ВТ працює в режимі відновлення рівня в КТ. При цьому РК поступово відкривається починаючи з 15 %, що, навпаки, зменшує термічні навантаження на обладнання РУ.

Для порівняння отриманих результатів з використанням РК проводилися розрахунки без модифікації САОЗ ВТ. У розрахункових сценаріях без використання РК на початковому етапі управління аварією, з досягненням рівня в КТ 8 м, відбувалось почергове переведення насосів на рециркуляцію (дії персоналу). Ці дії аналогічні автоматичному закриттю РК у першому режимі роботи. За потреби персонал вводив насоси САОЗ ВТ в роботу на перший контур для підтримання необхідного запасу до насичення.

**Результати управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий з використанням РК САОЗ ВТ без додаткових відмов обладнання.** Щоб визначити ефективність РК САОЗ ВТ для ліквідації течі теплоносія з першого контуру в другий розраховано базовий (без додаткових відмов) варіант протікання аварії для випадків без та з використанням РК САОЗ ВТ. Оскільки швидкість і динаміка протікання аварії залежать від розміру течі, розрахунки проводились для різних діаметрів течі: 40, 60, 80 та 100 мм.

За результатами розрахунків було встановлено, що застосування РК на напорі САОЗ ВТ з використанням режимів роботи РК, про які йшлося вище, дає змогу, в процесі управління аварією з течею першого контуру в другий, зменшити інтегральну витрату в течу на величину від 3 до 11 т порівняно з випадком без використання РК (рис. 1). Основний внесок в інтегральну витрату спостерігається в перші хвилини протікання аварії до моменту зрівняння тисків першого контуру та аварійного ПГ. При цьому зі збільшенням діаметра течі швидше досягаються уставки спрацювання аварійного захисту, раніше відбувається вхід до СОАІ і, відповідно, швидше розпочинаються дії щодо припинення міжконтурної течі. Відповідно, зменшується час до зрівняння тисків у першому контурі та аварійному ПГ, коли відбувається формування основної частини інтегральної витрати. Наприклад, для Ду 40 мм значення інтегральної витрати встановлюється протягом перших 600 с (рис. 2), тоді як для течі Ду 100 мм — за 350 с (рис. 3).

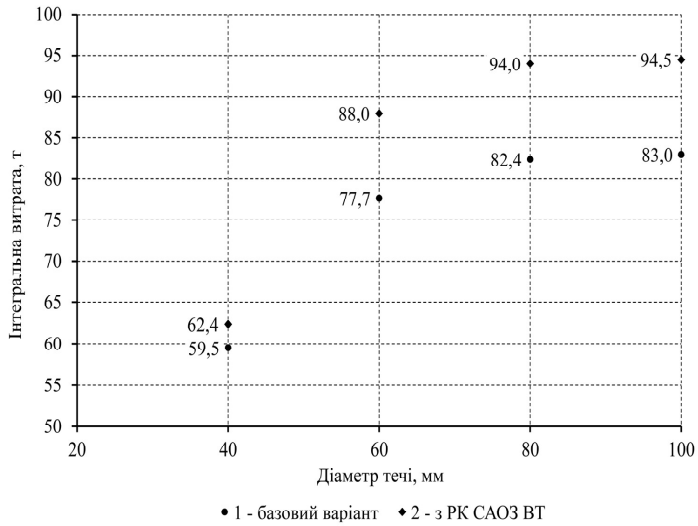


Рис. 1. Інтегральна витрата в течу з першого контуру в другий

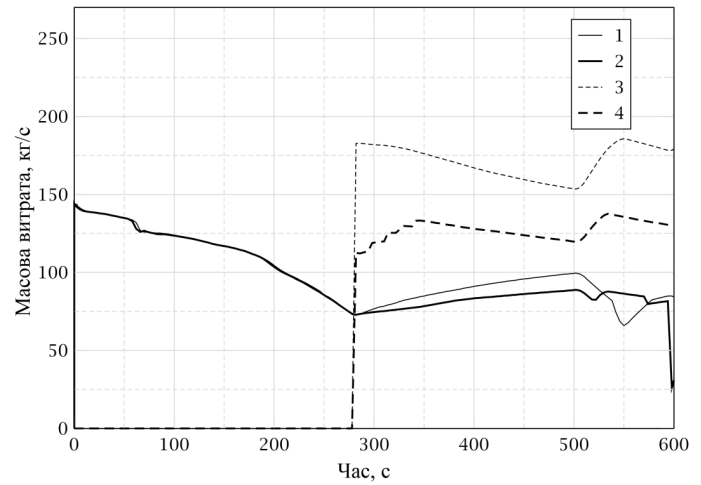


Рис. 2. Масові витрати для течі Ду 40 мм:  
1 — витрата в течу за базовим варіантом; 2 — витрата в течу з РК САОЗ ВТ;  
3 — витрата від САОЗ ВТ за базовим варіантом; 4 — витрата від САОЗ ВТ з РК

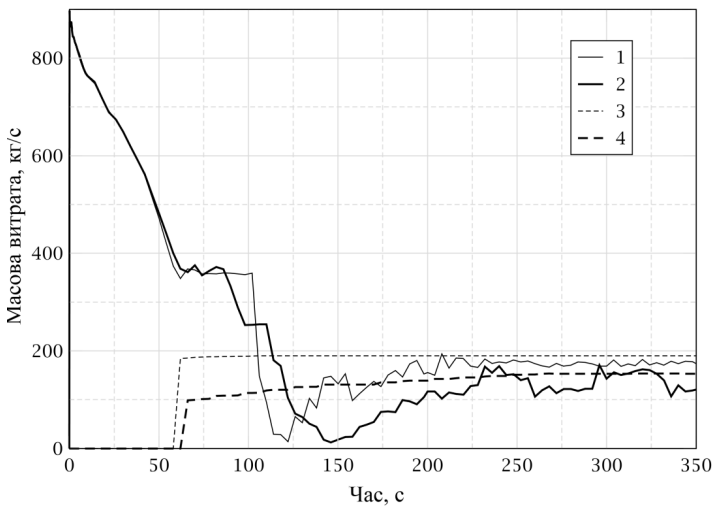


Рис. 3. Масові витрати для течі Ду 100 мм:  
1 — витрата в течу за базовим варіантом; 2 — витрата в течу з РК САОЗ ВТ;  
3 — витрата від САОЗ ВТ за базовим варіантом; 4 — витрата від САОЗ ВТ з РК

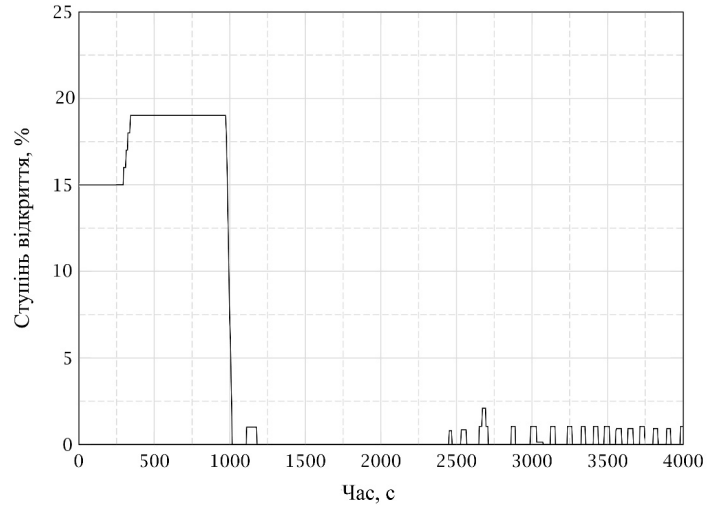


Рис. 4. Ступінь відкриття РК САОЗ ВТ (сценарій без додаткових відмов)

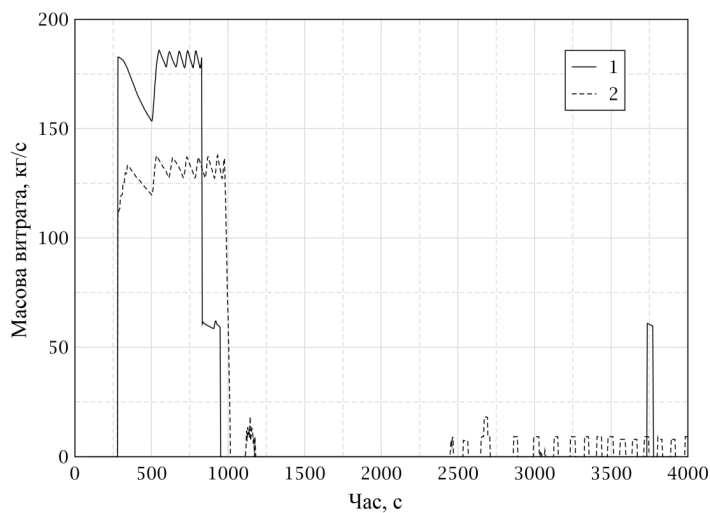


Рис. 5. Масова витрата від насосів САОЗ ВТ (сценарій без додаткових відмов):  
1 — базовий варіант; 2 — з РК САОЗ ВТ

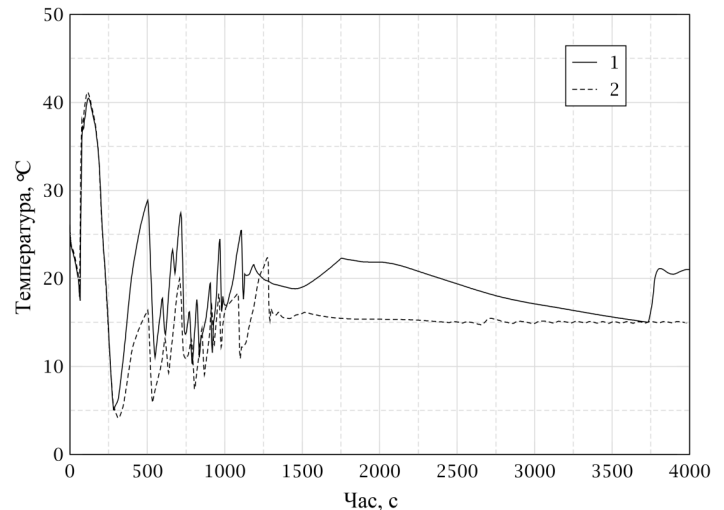


Рис. 6. Мінімальний запас до температури насичення в гарячих нитках ГЦТ (сценарій без додаткових відмов):  
1 — базовий варіант; 2 — з РК САОЗ ВТ

Таким чином, мінімізація інтегральної витрати відбулася обмеженням подачі від САОЗ ВТ в режимі заповнення КТ до моменту зрівнювання тисків у першому контурі та аварійному ПГ.

Течі з діаметрами меншими за Ду 40 мм не розглядалися, оскільки при їх протіканні персонал має значні запаси часу для організації відповідних дій з управління аварією. Наприклад, за результатами виконаних розрахунків, для течі Ду 20 мм формування сигналу САОЗ по запасу до насичення першого контуру відбувається орієнтовно через 2000 с після початку аварії.

Виконані розрахункові аналізи показали, що величина витрати від САОЗ ВТ в період до зрівнювання тисків першого контуру та аварійного ПГ має істотний вплив при течах середніх діаметрів (Ду 60–100 мм), тоді як при менших течах (до Ду 40 мм) такий вплив практично відсутній (див. рис. 1).

Відповідно, дії з обмеження підживлення першого контуру від САОЗ ВТ у початковий період протікання аварії з течею з першого контуру в другий є найбільш критичними з точки зору зменшення інтегральної витрати в течу саме для теч середніх діаметрів.

З урахуванням того, що зі збільшення діаметра течі запас часу на виконання дій оператором зменшується, істотний вплив на значення інтегральної витрати матиме автоматизована робота РК САОЗ ВТ.

Для більш детального аналізу особливостей протікання аварії розглянемо найменший діаметр течі, при якому доцільно використовувати РК для зменшення втрат теплоносія (див. рис. 1), а саме течу теплоносія з першого контуру в другий Ду 40 мм.

Результати розрахунків показали, що з використанням РК робота насосів САОЗ ВТ приводить до меншого (на 10 кгс/см<sup>2</sup>) підвищення тиску в першому контурі порівняно з конфігурацією без РК, що дає змогу більш ефективно зменшити різницю тисків між першим контуром та аварійним ПГ до моменту відкриття арматури САГ.

Використання РК сприяє відновленню рівня в КТ за меншої витрати від САОЗ ВТ (рис. 4, 5). Однак відновлення рівня відбувається на 200 с пізніше, ніж для сценарію без РК. При цьому створюється необхідний запас до насичення в першому контурі (рис. 6) і в подальшому підтримується роботою пароскидних пристроїв неаварійних ПГ і періодичним упорскуванням від САОЗ ВТ. Зазначимо, що аварійна петля є «застійною» і, відповідно, мінімальний запас до насичення в першому контурі встановлюється саме в ній.

**Результати управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий з використанням РК САОЗ ВТ із заклинюванням арматури САГ у відкритому положенні.** В управлінні аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий важливу роль відіграє своєчасне відкриття арматури САГ з метою більш ефективного зниження тиску першого контуру та підтримання його на рівні 66–70 кгс/см<sup>2</sup>. Дії з управління арматурою САГ дають змогу припинити течу, більш ефективно відновити рівень у КТ та мінімізувати можливість спрацювання пароскидних пристроїв аварійного ПГ. Враховуючи необхідність періодичного управління арматурою САГ існує ймовірність, що вона може відмовити, тому для сценарію протікання аварії з течею теплоносія з першого контуру в другий Ду 40 мм вибрано випадок із заклинюванням арматури САГ у повністю відкритому стані.

Така запроєктна аварія поєднує в собі міжконтурну течу та течу першого контуру. У випадку без РК, після

відновлення рівня в КТ, оператор почергово вимикає насоси САОЗ ВТ і, за потреби, знову вводить їх у роботу на перший контур залежно від значення та тенденції зміни запасу до насичення (рис. 7, 8).

У разі управління САОЗ ВТ періодичним введенням насосів у роботу на перший контур неможливо встановити оптимальне значення витрати для підтримки необхідного запасу до насичення і компенсації течі без надлишкового підживлення, що в результаті призводить до поступового збільшення втрати теплоносія через САГ. Такий спосіб регулювання витрати потребує постійного контролю та оперативних дій персоналу, що створює додаткове навантаження на персонал та збільшує ймовірність допущення помилок.

Використання РК САОЗ ВТ допомагає вирішити проблему встановлення оптимальної витрати, однак не відкидає необхідності оперативних дій персоналу.

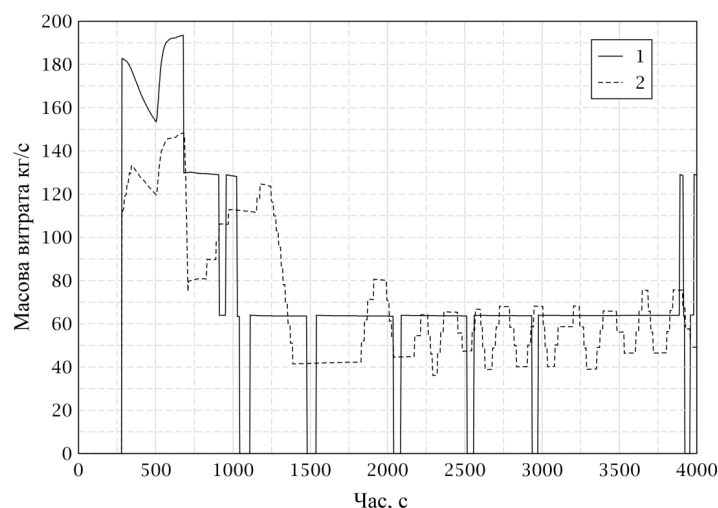


Рис. 7. Масова витрата від насосів САОЗ ВТ (сценарій із заклинюванням арматури САГ): 1 — базовий варіант; 2 — з РК САОЗ ВТ

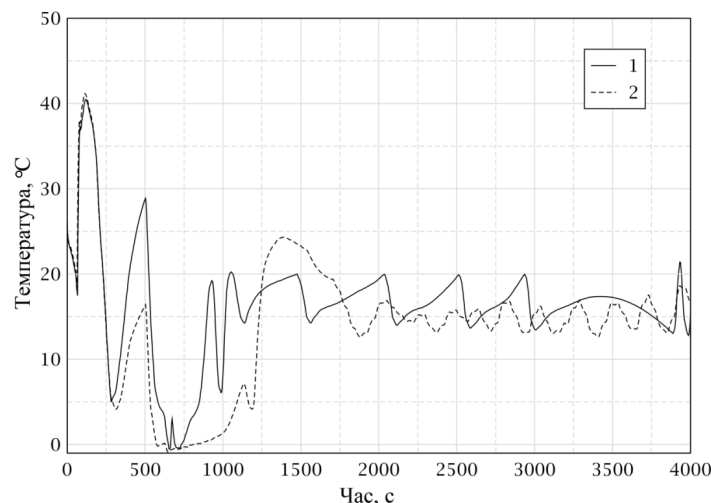


Рис. 8. Мінімальний запас до температури насичення в гарячих нитках ГЦТ (сценарій із заклинюванням арматури САГ): 1 — базовий варіант; 2 — з РК САОЗ ВТ

Враховуючи складність управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий, використання автоматизованого управління РК САОЗ ВТ є найбільш доцільним, оскільки, додатково до встановлення оптимальної витрати, дає змогу зменшити надлишкове навантаження на оперативний персонал.

### Висновки

За результатами оцінки управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий з використанням РК САОЗ ВТ визначено, що:

існує можливість зменшення інтегральної витрати в течу на початку протікання аварії на величину від 3 до 11 т порівняно з випадком без використання РК з одночасним забезпеченням необхідного запасу до насичення в першому контурі;

використання РК в частині зменшення інтегральної витрати в течу найбільш ефективно в діапазоні теч Ду 60–100 мм;

у разі подачі теплоносія від САОЗ ВТ тиск у першому контурі збільшується на меншу величину порівняно з конфігурацією без РК, що дає змогу зменшити витрату через САГ при зрівнюванні тисків між першим контуром та аварійним ПГ;

у разі використання РК відновлення рівня в КТ відбувається дещо пізніше, однак без надлишкового підживлення першого контуру від САОЗ ВТ;

автоматизація роботи РК дозволить максимально використати його переваги, оскільки в такому випадку робота починається до моменту дій персоналу з управління аварією та не потребує його участі. Зазначимо, що обґрунтування автоматизованої роботи РК САОЗ ВТ вимагає виконання значної кількості досліджень та перегляду наявної аналітичної бази (зокрема аналізу проектних та запроектованих аварій), тому на цей час введення РК в роботу та управління його положенням здійснюється оператором у дистанційному режимі (енергоблоки №№ 1, 2 Рівненської АЕС та №№ 1, 2 Южно-Української АЕС).

Разом з тим виявлено, що робота РК САОЗ ВТ супроводжується явищем автоколивань (див. рис. 5, 7, 8) у режимі підтримання запасу до насичення. Для уникнення автоколивань алгоритм роботи РК має бути доопрацьований завдяки розширенню набору контрольованих параметрів [4], використання лінії рециркуляції тощо.

### Список використаної літератури

1. Про затвердження Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій : Постанова КМУ від 07.12.2011 № 1270. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1270-2011-p>
2. Розробка багатоцільової теплогідрравлічної моделі ЯПВУ із ВВЕР-1000/320. Деталізація основних компонентів моделі : Звіт про науково-дослідну роботу / ДНТЦ ЯРБ. — К., 2010. — 788 с.
3. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР : монография / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. — Чернобыль (Киев. обл.) : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2010. — 200 с.
4. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах : монография / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Васченко, С. С. Яровой; под ред. В. И. Скалозубова; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. — Чернобыль (Киев. обл.) : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2012. — 280 с.

### References

1. On Approval of the Comprehensive (Integrated) Safety Improvement Program for Nuclear Power Plants. Ordinance of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1270 dated 07 December 2011 [Pro zatverdnhennia Kompleksnoi (zvedenoj) prohramy pidvyshchennia ravnja bezpeky enerhoblokov atomnykh elektrostantsii: Postanova KМУ vid 07.12.2011 No. 1270], available at: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1270-2011-p> (Ukr)
2. Development of Multipurpose Thermohydraulic Four-Looped Model of NPP with VVER-1000/320. Specification of the Model Main Components (Final Stage): R&D Report [Zvit pro naukovo-doslidnu robotu. Rozrobka bahatotsilivoj teplohidravllichnoi modeli YaPVU iz VVER-1000/320. Detalizatsiia osnovnykh komponentiv modeli], SSTC NRS, Kyiv, 2010, No. 0109U008229, 788 p. (Ukr)
3. *Skalozubov, V.I., Klyuchnikov, A.A., Komarov Yu.A., Shavlakov A.V.* (2010), “Scientific and Technical Basis of Safety Improvement Measures for NPPs with VVER” [Nauchno-tekhnicheskie osnovy meropriyatiy povysheniia AES s VVER], Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, Chornobyl, Kyiv Region, 200 p. (Rus)
4. *Skalozubov, V.I., Klyuchnikov, A.A., Vaschenko, V.N., Yarovoi, S.S.* (2012), “Analysis of Causes and Consequences of Fukushima Accident for Prevention of Severe Accidents in Vessel-Type Reactors” [Analiz prichin i posledstviy avarii na AES Fukusima kak faktor predotvrashcheniia tiazhelykh avarii v korpusnykh reaktorakh], Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, Chornobyl, Kyiv Region, 280 p. (Rus)

Отримано 11.05.2016.