

***Використання інжектору в системі аварійного охолодження активної зони для  
збереження корпусу реактора***

***Использование инжектора в системе аварийного охлаждения активной зоны для  
сохранения корпуса реактора***

***Using an injector in the emergency core cooling system to preserve the reactor vessel***

Науковий керівник - проф. каф. Атомних електричних станцій, доктор техн. наук

Корольов О. В., Королев А. В., Korolyov A. V

Студент групи ТЯ-1506 – Бочаров М. О., Бочаров М. О., Bocharov M. O.

**Анотація:** У статті розглянуто використання інжектору в системі аварійного охолодження активної зони реактора ВВЕР-1000, що експлуатуються на енергоблоках АЕС України. Приведено декілька способів включення інжектору в схему САОЗ.

**Ключові слова:** інжектор, САОЗ.

**Аннотация:** В статье рассмотрено использование инжектора в системе аварийного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР-1000, которые эксплуатируются на энергоблоках АЭС Украины. Приведены несколько способов включения инжектора в схему САОЗ.

**Ключевые слова:** инжектор, САОЗ.

**Annotation:** The article discusses the use of an injector in the emergency cooling system of the VVER-1000 reactor core, which are operated at the power units of Ukrainian NPPs. Several ways of connecting the injector to the ECCS circuit are presented.

**Keywords:** injector, ECCS.

### **Введення**

В атомній енергетиці як і скрізь, кожний інцидент, що трапляється, являється поштовхом для підвищення безпеки. Вимоги до безпеки нових енергоблоків, які проектуються та споруджуються, завжди зростають. Але це також стосується і діючих, на яких по мірі можливостей відбуваються заходи для вдосконалення та поліпшення діючих систем безпеки. Однією з таких є система аварійного охолодження активної зони, що входить до складу реакторної установки.

Система аварійного охолодження активної зони (САОЗ) використовується для забезпечення тепловідводу залишкового енерговиділення активної зони реактора і розхолодження першого контуру з заданою швидкістю в режимах планового розхолодження і аварійного розхолодження.

Пасивна частина системи аварійного охолодження активної зони призначена для швидкої подачі розчину борної кислоти в реактор для першочергового охолодження активної зони і підтримування підкритичного стану активної зони реактора розчином борної кислоти з гідро ємностей системи аварійного охолодження активної зони при аваріях з втратою теплоносія, коли тиск в першому контурі падає нижче ніж тиск в ГЄ САОЗ на  $0,3 \text{ кгс/см}^2$ . Розчин борної кислоти в цих ємностях має температуру  $60^\circ\text{C}$ , що значно нижче ніж температура корпусу реактора  $300^\circ\text{C}$ . Така різниця в температурі призводить до охрупчення металу корпусу, що веде до появи пошкоджень металу реактора, зокрема тріщин.

### **1. Призначення системи**

Система аварійного охолодження активної зони призначена для відводу залишкового тепловиділення активної зони реактора при розгерметизації першого контуру.

Система використовується для забезпечення тепловідводу залишкових енерговиділень активної зони реактора і розхолодження першого контуру з заданою швидкістю в режимах планового розхолодження і аварійного розхолодження.

Пасивна частина САОЗ призначена для швидкої подачі розчину борної кислоти в реактор для першочергового охолодження активної зони і підтримування підкритичного стану активної зони реактора розчином борної кислоти з гідро ємностей САОЗ при аваріях з втратою теплоносія, коли тиск в першому контурі падає нижче ніж тиск в ГЄ САОЗ на  $0,3 \text{ кгс/см}^2$ .

## 2. Склад та опис технологічної схеми пасивної частини САОЗ

Основними компонентами пасивної частини САОЗ є чотири ГЄ САОЗ (2ТН51-54В01), трубопроводи та арматура.

ГЄ САОЗ являє собою вертикальний циліндричний посуд з еліптичними днищами, установлений на циліндричній опорі і заповнений борованою водою під тиском, який утворюється за допомогою азотної подушки. Кожна з ГЄ САОЗ сполучена з реактором окремим трубопроводом Ду 300. Дві ГЄ САОЗ сполучені з вхідною камерою, а дві інші з вихідною камерами реактора.

Під час нормальної експлуатації РУ кожна ГЄ САОЗ відокремлена від реактора двома послідовно розміщеними зворотними клапанами Ду 300(2ТН51-54S03,04). Коли тиск в реакторі падає нижче тиску в ГЄ, зворотні клапани автоматично відкриваються і борована вода з ГЄ поступає в реактор.

Окрім зворотних клапанів, на кожному трубопроводі встановлено по дві швидкодіючі запірні засувки Ду 300 (2ТН51-54S01,02), які забезпечують відсікання ГЄ від реактора з метою виключення попадання азоту в реактор при спорожненні ГЄ. В процесі нормальної експлуатації обидві засувки відкриті.

На кожній ГЄ САОЗ встановлено по два запобіжних клапани (2ТН51-54S06,07). Пропускна здатність клапану вибрана з умови не перевищення розрахункового тиску в ГЄ САОЗ більше, ніж на 10% і складає при тиску  $65,0 \text{ кгс/см}^2$  і температурі робочого середовища  $60^\circ\text{C}$ , 6,0 т/г – на азоті і 30,0 т/г на воді, що перевищує максимальну витрату систем заповнення ГЄ САОЗ азотом і водою.

Трубопроводи пасивної частини САОЗ призначені для з'єднання ГЄ САОЗ з реактором і забезпечення подачі борованої води в реактор в режимах, потребуючих спрацювання пасивної частини САОЗ.

Кожний з чотирьох трубопроводів оснащений:

- двома зворотними клапанами (2ТН51-54S03,2ТН51-54S04) з обхідними каналами (2ТН55-58S01,02,03,04);
- двома швидкодіючими запірними засувками;
- системою опор.
- Система опор трубопроводів пасивної частини САОЗ складається з:
- опор, що приймають навантаження при нормальних умовах експлуатації;
- опор, що призначені для сприйняття навантаження, обумовлених аварійними ситуаціями, зв'язаними з поперечними розривами самих трубопроводів.

На трубопроводі між зворотними клапанами мається відвід, до якого підключений напірний трубопровід насосів аварійного розхолодження.

Зворотні клапани призначені для відсікання ГЄ САОЗ від реактора в процесі нормальної експлуатації РУ. Використовуються зворотні клапани прямої дії з закритими кришками і дистанційним вказівником кінцевих знаходжень запірного клапану.

Для організації розігріву трубопроводів і перевірки щільності зворотного клапану передбачені обхідні канали лінії паралельно зворотнім клапанам. На кожному обхідному каналі лінії встановлено послідовно два сильфонних запірних вентиля Ду 15 з

електроприводом. Вентилі, окрім організації процесу розігріву, призначені також для перевірки щільності зворотних клапанів.

Під час нормальної експлуатації ці вентилі закриті.

Швидкодіючі запірні засувки Ду 300 передбачені для наступних цілей:

- відключення ГЄ САОЗ при зниженні в ній рівня до 2000мм, для виключення попадання азоту в реактор;
- відключення ГЄ САОЗ при плановому зниженні тиску в першому контурі;
- відключення ГЄ САОЗ при несправності одного чи обох зворотних клапанів;
- здійснення огляду, ревізії або ремонту ГЄ САОЗ.

Під час нормальної експлуатації РУ засувки відкриті.

З метою забезпечення крихкої міцності корпусу реактора під час забезпечення подачі борованої води в перший контур з температурою від 55°C до 60°C (для реакторів працюючих не менше 10 років) виконано підігрів борного розчину в ГЄ САОЗ.

Підігрів здійснюється за допомогою винесеного електронагрівача та заснований на принципі природної циркуляції.

Система підігріву складається з електронагрівача (2ТН61-64W01), з'єднаного трубопроводом з трубопроводом заповнення ГЄ САОЗ і трубопроводом спорожнення ГЄ САОЗ в систему організованих протікань.

Трубопроводи системи підігріву врізаються в відключені запірною арматурою (з боку ГЄ САОЗ) ділянки вказаних систем, утворюючи замкнутий контур циркуляції.

З'єднувальний трубопровід «ГЄ САОЗ – нагрівач» забезпечений ручною арматурою для відключення підігрівача від ГЄ САОЗ.

Робочі параметри системи підігріву ГЄ САОЗ:

- температура води на виході з підігрівача не більш ніж 75°C;
- рівень води в ГЄ не нижче 6200мм;
- тиск в ГЄ не більше 65,0 кгс/см<sup>2</sup>.
- Пасивна частина системи САОЗ зв'язана з наступними системами:
- підпитки, що забезпечує подачу розчину борної кислоти в ГЄ, витратою до 60,0 м<sup>3</sup>/ч і температурою від 20°C до 60°C;
- організованих протікань, що забезпечує злив розчину борної кислоти з ГЄ, з температурою від 35°C до 60°C, витратою до 5,0 /ч;
- азоту високого тиску, що забезпечує подачу азоту в ГЄ тиском від 1,0 кгс/см<sup>2</sup> до 60,0 кгс/см<sup>2</sup> і температурою від 20°C до 60°C;
- газовидалення, що забезпечує повітря видалення при заповненні ГЄ, скидання газу з одної ГЄ об'ємом 10,0 м<sup>3</sup>, витратою до 60,0 м<sup>3</sup>/ч і температурою від 20°C до 60°C при тиску в ГЄ менше 18,0 кгс/см<sup>2</sup>;
- контролю щільності ущільнень роз'ємів обладнання РУ;
- відбору проб.

### **3. Недоліки системи САОЗ що діє зараз**

Перш за все недоліки скриваються в особливостях металу корпусу, на котрий недопустимо проливати холодну воду.

Метал реактору являється схильним до хрупкості при низьких температурах. Для прикладу (див. табл. 1) наведено залежність мінімальної температури металу корпусу при тиску теплоносія в реакторі більше 3,43 МПа від його року використання. Розігрів до цих температур виконується за допомогою головних циркуляційних насосів.

В гідро ємностях САОЗ розчин борної кислоти має температуру 60°C. При спрацюванні системи, коли в реактор буде залитий розчин з низькою температурою, така різниця в температурі призведе до охрупчення металу корпусу, що веде до появи

пошкоджень металу реактора, зокрема тріщин. Для запобігання цього пропонується підігрівати воду, що подається, за допомогою пароводяного інжектора.

Таблиця 1

Назва	Величина								
	Рік експлуатації								
	1	4	8	12	16	20	24	28	30
Мінімальна температура металу корпусу, °С	50	86	97	103	108	112	115	118	119

#### 4. Використання інжектору в системі САОЗ

В своїй роботі мій науковий керівник розглядав декілька можливих режимів роботи інжектора. Мета даної схеми – захист корпусу і активної зони від термовтомних навантажень при спрацюванні системи САОЗ, а також продовження часу розхолодження.

Нагрів води в УТ напрямком збільшення кількості ТЕН або збільшенням їх потужності, не вигідний, так як потребує тривалого утримання УТ в гарячому резерві і не дає бажаної температури нагріву води для умов міцності корпусів УТ.

Представляється доцільним підігрівати воду за межами УТ. Воду, що поступає з УТ, пропонується підігрівати в інжекторі, змішуванням з водою або паром що поступає з УР. Запропонована схема відсікає від гарячої петлі компенсатору об'єму, і перенаправляє воду з УР в УС через інжектор в патрубках САОЗ. Таке включення усуває вихід води з УР через гарячу петлю до місця витоків, або усуває зворотній хід теплоносія по гарячій петлі в реактор і посилення перекидання циркуляції при витоків, викликаній пошкодженням по лінії холодної петлі ГЦК.

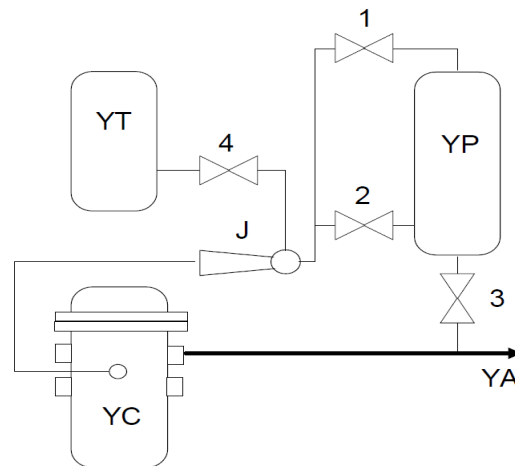


Рисунок1 – Принципова розрахункова схема з включенням інжектора

Для реалізації схеми по рис 1, на лінії підключення УР до петлі УА, встановлюється швидкодіюча запірні арматура 3. На трубопроводі з'єднуючим УТ і УС встановлюється пароводяний інжектор J, з'єднаний по ежекційній лінії з УТ (арматура 4), а по лінії робочого середовища з УР (арматура 1 і 2). Принципова відмінність режимів роботи системи САОЗ для цих двох випадків наступне. При відкритій арматурі 1 і закритій 2, живлення інжектора здійснюється паром і він працює в режимі пароводяного інжектора, з підвищеним тиском на виході і коефіцієнтом інжекції від 7 до 30.

Особливістю роботи по такому підключенню являється достатньо швидке падіння пару в УР і припинення роботи схеми при наблизненні тиску в УР і УТ ( розрахункові оцінки дають 10...12 хв.). При закритій арматурі 1 і відкритій 2, інжектор працює в режимі водоводяного, на воді що закипає з коефіцієнтом інжекції 2...7. Позитивною стороною такого включення є можливість підтримання тиску в УР, практично до повного виходу запасу води УР через інжектор.

В інжекторі проходять процеси змішення робочої води або пару з УР з водою, що піддається ежекції, з УТ, при цьому відбувається підігрів і підвищення тиску води, що поступає в розвантажений УС через патрубки САОЗ. При закритті арматури 1 і 2, вода з УТ може подаватись в УС по звичайній схемі, через камеру змішення інжектору, маючого в цьому випадку опір сумірний з опором відкритої арматури.

Але в даній запропонованій схемі є недолік – використання арматури або іншого відсічного елемента на з'єднанні компенсатору тиску і ГЦК. Коли відсікається компенсатор тиску – перший контур стає «жорстким», що може призвести до його розриву.

Зараз у трубопроводі ДУ-350, що з'єднує КТ і ГЦК, встановлений обмежувач течії діаметром 100мм. Пропонується залишити це з'єднання і підключити інжектор для роботи в пароводяному режимі. В такому разі, при розгерметизації першого контуру в трубопроводі, що з'єднує КТ і ГЦК, максимальна швидкість витікання води буде дорівнювати 15 м/с, так як там виникає криза течії.

$V = 55\text{м}^3$  – об'єм води у КТ,  $S = 0,007854\text{ м}^2$  – площа перерізу при  $r = 100\text{мм}$ ,

$W_{\text{кр}} = 15\frac{\text{м}}{\text{с}}$  – критична швидкість

$$t = \frac{V}{W_{\text{кр}} * S} = \frac{55}{15 * 0,007854} = 466,8\text{ с}$$

З даного рівняння видно, що повне опорожнення КТ відбудеться за приблизно 7-8 хвилин. Цього часу буде достатньо аби забезпечити роботу схеми з включенням пароводяного інжектора, що забезпечить підігрів води до більших температур та тиску.

#### Висновки

Використання схеми із включенням пароводяного інжектора в систему САОЗ дозволить збільшити температуру розчину, що подається, під час спрацювання системи. Дане рішення допоможе зберегти корпус реактора від сильних температурних перепадів, та дасть змогу включати систему САОЗ при більшому тиску в першому контурі ніж зараз встановлено.

#### Перелік посилань

1. УПО-РЦ-2-130. Система аварійного і планового розхолодження(ТQ-12). – 92 с.
2. УПО-РЦ-2-136. Система аварійного розхолодження активної зони (пасивна частина) (УТ). – 91 с.
3. Королев А.В. Использование инжектора в системе САОЗ для повышения ее функциональной надежности. // Ядерная радиационная безопасность. Том 12. Вып.2. 2009 – С. 38—39.
4. Королёв О. В. КОМПОЗИЦИОННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ТУРБОПРИВОДА НАСОСНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ РЕЗЕРВНОЙ ПОДПИТКИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС / О.В. Королёв, О.В. Деревянко // Праці Одеського політехнічного університету, 2014. – Вип. 1(43). – С. 93-96.

Корольов Олександр Вікторович, Королев Александр Викторович, Korolyov Aleksandr V.,  
Бочаров Михайло Олегович, Бочаров Михаил Олегович, Bocharov Michael.