

Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність

- **Кравченко Володимир Петрович**, д-р техн. наук, проф.
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7557-3327>
- **Власов Анатолій Петрович**
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-7074-7735>
- **Головченко Андрій Михайлович**
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7021-451X>
- **Мазуренко Антон Станіславович**, д-р техн. наук, проф.
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0165-3826>
- **Дубковський В'ячеслав Олександрович**, д-р техн. наук, проф.
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-7104>
- **Чулкін Олег Олександрович**, канд. техн. наук, доц.
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5048-4515>

Система герметичного огороження є четвертим бар'єром безпеки на шляху виходу радіоактивних елементів та іонізуючого випромінювання в навколишнє середовище у разі аварії. Її надійності приділяється велика увага: після кожного планово-попереджувального ремонту або після кожного позаштатного розущільнення засобів локалізації аварії здійснюються випробування системи герметичного огороження на герметичність. Під час цих випробувань на АЕС України використовується метод «абсолютного тиску». За цим методом за результатами вимірювання тиску, температури та вологості повітря визначається маса наявного в системі герметичного огороження повітря за рівнянням Менделєєва-Клапейрона. Тобто виток визначається непрямим методом: розрахунком маси наявного повітря в об'ємі протягом деякого часу. Зараз на АЕС України досягнуто доволі високі показники герметичності, тобто інтегральний витік достатньо малий, тому методичні основи випробувань мають удосконалюватися. Складність та велика тривалість випробувань за методом «абсолютного тиску» (більш ніж доба) є стимулом для скорочення часу випробувань. У статті запропоновано замість методу «абсолютного тиску» для визначення інтегрального витіку, як критерію герметичності системи герметичного огороження, використовувати перспективний компенсаційний метод. Останній дозволяє визначити інтегральний витік із системи герметичного огороження прямим вимірюванням значно швидше і точніше. Наведено схему та принцип використання компенсаційного методу за допомогою контрольної ємності. Описано методику проведення вказаного вище вимірювання. Зазначається, що компенсаційний метод потребує використання приладу вимірювання малої витрати повітря, що спричиняє певні труднощі. Зазначається, що до верифікації нового методу мають використовуватися два методи одночасно. Проаналізовано всі п'ять етапів проведення випробувань. Показано, що через відсутність етапу вакуумування (можливість чого має підтверджуватися запланованим графіком нагнітання повітря до щільної системи герметичного огороження), використання ежектора

(для скорочення часу нагнітання), компенсаційного методу вимірювань та зменшення етапу стабілізації температури тривалість випробувань може бути зменшена на 56 %.

Ключові слова: інтегральний витік, компенсаційний метод вимірювання витоку, система герметичного огороження.

© Кравченко В. П., Власов А. П., Головченко А. М., Мазуренко А. С., Дубковський В. О., Чулкін О. О., 2023

Вступ

Основне обладнання реакторної установки, яке експлуатується в Україні на енергоблоках АЕС (це здебільшого реактори ВВЕР-1000), розміщують у циліндричних конструкціях (контейнерах) із попередньо напруженого залізобетону з випуклою овальною покрівлею [1], [2]. Контейнер розрахований на внутрішній тиск до 5 кг/см². Оскільки бетон не є щільною перепорою для газових середовищ, контейнер зсередини має герметичне облицювання зі щільного металевого покриття товщиною 8 мм. Контейнер належить до локалізуючих систем безпеки та виконує функцію четвертого бар'єра глибоко ешелонованого захисту від розповсюдження радіоактивних речовин та випромінювання в навколишнє середовище в разі аварії на АЕС. Герметичність контейнера забезпечується також елементами системи локалізації аварії (СЛА), а зусилля, які можуть виникати за аварійних умов під час дії внутрішнього тиску на металеве облицювання, сприймаються залізобетонною захисною оболонкою (ЗО). Міцність ЗО забезпечують попередньо напружені сталеві троси, які проходять у спеціальних каналах у стінці та куполі ЗО [3]. ЗО є також бар'єром і для зниження радіоактивного випромінювання з герметичного об'єму (ГО). Надійність системи герметичного огороження (СГО) перевіряють проведенням випробувань герметичності надлишковим внутрішнім тиском повітря з визначенням інтегрального витоку (ІВ), що регламентується Правилами ядерної безпеки [4].

Випробування для визначення ІВ проводяться в декілька етапів, а саме [5]:

1. Вакумування СГО для визначення місць нещільності та усунення пошкоджень – 4 години.
2. Нагнітання повітря до контрольного тиску. Визначення нещільності вузлів СЛА (основного та допоміжного шлюзів, люку транспортного коридору та ін.) – 8 годин (4,5 години для Рівненської АЕС).
3. Стабілізація параметрів для вирівнювання температури по всьому об'єму – 8 годин.
4. Проведення вимірювань температури, тиску та вологості – 8 годин.
5. Скидання тиску – 1,5 години.

Вказаний у переліку час є практично мінімальним і може бути різним для різних АЕС та блоків через різне розташування компресорної від енергоблоків та за інших причин.

Як видно, для проведення випробування герметичності СГО необхідно витратити часу більше однієї доби. У деяких нормативних документах наводиться загальний час випробувань у 32 години. Причому зауважимо, що ніякі роботи в ГО в цей період не проводяться. Тобто випробування для визначення ІВ, значення якого підтверджує можливість роботи енергоблоку на потужності, знаходиться на критичному шляху мережевого графіка планово-попереджувального ремонту і заслуговує відповідної уваги та зусиль для зменшення часу на його проведення.

Метою роботи є визначення факторів, які сприяють зменшенню часу визначення ІВ під час систематичних випробувань герметичності СГО з підвищенням ефективності контролю надійності цієї системи безпеки.

Визначення ІВ здійснюється методом «абсолютного тиску», водночас зауважимо, що цей метод не є досконалим. Суть методу полягає в тому, що навіть разові визначення ІВ виконують після отримання великого числа параметрів повітря всередині ГО з використанням рівняння ідеального газу Менделєєва-Клапейрона. Для визначення параметрів повітря (температури, тиску, вологості) використовується велика кількість приладів у різних місцях ГО і спеціальний комплекс для усереднення та обробки результатів вимірювання з наступним визначенням ІВ. Отже, ІВ визначається непрямим методом завдяки розрахунку з використанням вимірних значень температури, тиску та вологості.

Особливості методу «абсолютного тиску»

Події на Чорнобильській АЕС у 1986 році підвищили увагу до забезпечення герметичності СГО з посиленням норм допустимого витоку. З огляду на те, що СГО є одним з бар'єрів, який запобігає виходу радіоактивних речовин у навколишнє середовище, будівельниками та експлуатаційниками довелося докласти значних зусиль для покращення герметичності СГО,

удосконалення відповідних методів та засобів контролю елементів СЛА [5]. Завдяки цим зусиллям у перші роки випробувань герметичності СГО енергоблоків АЕС України була знайдена значна кількість місць негерметичності в облицюванні СГО та вузлах СЛА з усуненням цих дефектів. Це дозволило за кілька перших років експлуатації енергоблоків знизити ІВ до значень, які відповідають нормативним вимогам. Однак, час вимагав пошуку досконаліших засобів визначення ІВ. Уже перші випробування на Запорізькій АЕС нового компенсаційного способу визначення ІВ сприяли зниженню часу визначення ІВ практично на порядок [6]. Утім, нові перспективні способи визначення ІВ із СГО для зменшення часу випробувань і підвищення точності визначень ІВ в Україні все ще не верифіковані.

Відомо, що з часом ІВ із СГО може зростати через втрату матеріалами локалізуючих вузлів СЛА пружних властивостей. Це прискорюється внаслідок постійної дії на матеріали цих вузлів іонізуючого випромінювання. Матеріали локалізуючих вузлів СЛА – це здебільшого резино-технічні вироби, які швидко втрачають пружні властивості, тому їх стан треба періодично контролювати випробуваннями герметичності.

Складність методу «абсолютного тиску» та велика його тривалість зумовлюють пошук можливостей зі спрощення процедури випробувань або збільшення часу між випробуваннями [7]. Автори, враховуючи важливість забезпечення безпеки роботи АЕС та той факт, що з часом якість обладнання не покращується, вважають доцільним не збільшувати час між випробуваннями, а удосконалити методи та засоби, які використовуються для підтвердження функціональності цієї дуже важливої для АЕС системи безпеки.

Аналіз наведених етапів проведення випробування на герметичність та їх часу показує, що найбільший інтервал часу випадає на етапи нагнітання повітря, стабілізації та власне вимірювань.

Першим етапом випробувань є вакуумування. Метою цього етапу є виявлення місць нещільності за допомогою, переважно, акустичного методу та усунення виявлених дефектів. Зауважимо, що за останні 20 років на всіх блоках АЕС України під час вакуумування було виявлено тільки три дефекти (2004 рік – нещільність гермоклапанів вентсистеми; 2005 рік – нещільність пневморозподільчих коробок арматури; 2007 рік – виток повітря через вузол ущільнення монтажного люка транспортного отвору). Тому фахівці АЕС, відповідальні за проведення випробувань, пропонують з-за відсутності потреби відмовитися від цього етапу. Потреба в проведенні вакуумування може бути визначена під час нагнітання повітря. Якщо графік набирання тиску в СГО відповідає графіку попередніх ви-

пробувань під час нагнітання в щільну СГО, це означає, що етап вакуумування непотрібний. Якщо час досягнення відповідного тиску має запізнення відносно еталонного графіка, це означає, що нагнітання треба зупинити та провести вакуумування для усунення нещільності.

Після перевірки щільності вакуумування починається етап нагнітання повітря до досягнення надлишкового тиску $0,72 \text{ кгс/см}^2$. Для скорочення цього процесу було запропоновано використання ежектора [8]. За проведеним аналізом визначено, що використання ежектора для підвищення витрати повітря до СГО підсмоктуванням навколишнього повітря сприяє зменшенню часу нагнітання приблизно на 30%. Мінімальний час нагнітання, враховуючи обмеження за швидкістю підвищення тиску [5], дорівнює $0,72/0,4 = 1,8 \text{ год}$.

Зауважимо, що в деяких випадках є проблеми і зі скиданням тиску після випробувань. Максимальна швидкість скидання тиску згідно з [5] дорівнює $1,0 \text{ (кгс/см}^2\text{)/год}$. Тобто мінімальний час етапу скидання тиску в СГО дорівнює $0,72/1 = 0,72 \text{ год}$. Це практично в два рази швидше, ніж показує практика випробувань. Отже, тільки в разі удосконалення процесів нагнітання та скидання тиску можна зекономити $(8 - 1,8 + 1,5 - 0,72) 6,98 \text{ години}$, тобто $6,98/26 \times 100 = 26,7 \%$ наявного часу.

Вимірювання параметрів виконують після завершення етапу стабілізації параметрів. Умовою досягнення умов стабілізації параметрів, а саме температури повітря в різних місцях СГО, є зміна середньої температури в СГО не більше $0,025 \text{ }^\circ\text{C/год}$. Вважається, що період стабілізації може бути скорочений через інтенсифікацію процесів перемішування, а саме завдяки удосконаленню схеми подачі повітря до СГО.

Під час визначення ІВ потрібна велика кількість вимірювань параметрів стисненого повітря в СГО, жорстке дотримання умов вимірювань. За методом «абсолютного тиску» на першому етапі вимірюють локальні зміни тиску, вологості та температури закачаного в СГО повітря та періодично (кожні 2 хвилини) визначають окремі параметри з подальшим використанням рівняння стану середовища в СГО, а через нього вже визначається відсотковий витік [5]:

$$L = \frac{m_0 - m_1}{m_0} = 100 \cdot \left(1 - \frac{P_1 \cdot T_0 \cdot R_0}{P_0 \cdot T_1 \cdot R_1} \right), \% \quad (1)$$

де m_0 , m_1 – маса повітря в СГО на початок та кінець інтервалу часу;

P – тиск,

T – температура, К;

R – універсальна газова постійна, яка залежить від складу та вологості повітря.

Індекс «0» належить до початкового стану повітря в СГО на цьому проміжку часу, індекс «1» – до кінцевого стану.

Далі за результатами розрахунку погодинного витоку визначається добова величина витоку.

Випробування вважають успішними, якщо отримана в процесі випробувань величина прогнозованого інтегрального витоку задовольняє умову:

$$L_k \leq 1,15 \cdot L_{кр} \quad (2)$$

де $L_k = (L \pm \Delta L)$ – значення добового витоку, розраховане під час випробувань, %/добу;

L – визначене значення добового витоку, %/добу;

ΔL – сумарна похибка визначення ІВ; $\Delta L/L$ має бути менше 0,5 при довірчій ймовірності $P > 0,95$;

$L_{кр}$ – значення витоку, отримане під час передпускових налагоджувальних робіт при зниженому тиску, %/добу. Значення $L_{кр}$ для енергоблоків Запорізької АЕС [5]: № 1 – $(0,14 \pm 0,02)$ %/добу; № 2 – $(0,17 \pm 0,01)$ %/добу; № 3 – $(0,11 \pm 0,01)$ %/добу; № 4 – $(0,10 \pm 0,01)$ %/добу; № 5 – $(0,10 \pm 0,10)$ %/добу; № 6 – $(0,07 \pm 0,01)$ %/добу. Відсоткове значення витоку визначається від загальної маси повітря в СГО.

Проведення випробувань герметичності СГО за досягнутих рівнів герметизації ускладнюється тим, що параметри середовища в СГО мають такі зміни, за яких їх відхилення стають уже залежними не тільки від стану вузлів СЛА, а й від випадкових факторів (стану зовнішнього середовища, пори року, часу доби тощо). Врахування впливу цих факторів стає практично неможливим. Це призводить до необхідності шукати нові методичні основи визначення ІВ.

Що ж є головними причинами великої втрати часу під час випробувань герметичності СГО та елементів СЛА на АЕС? Крім зміни параметрів повітря в СГО, це й різні температури в приміщеннях та обладнанні в СГО, не завершені процеси теплообміну переважно в повітрі і в середовищах СГО в різні періоди року як поза, так і в середині. Це й різний ступінь охолодження обладнання під час попередніх до випробувань робіт, це й наявність проливів води, це й відкриті об'єми великих ємностей тощо. Різна температура охолоджуючої води, яка подається на вузли охолодження компресора нагнітання і різна температура навколишнього середовища також дають різні варіації температур повітря, яке подається в СГО. Зауважимо, що повітря для нагнітання береться з приміщення, яке обігривається взимку, але враховуючи великий об'єм необхідного для нагнітання повітря, треба констатувати вплив температури навколишньо-

го середовища на температуру повітря на вході в компресор. Компресор ЦК-135/8 має охолодження, тому температура на виході компресора коливається біля 22 °С. Уже тільки перелік етапів робіт та умов вимірювань свідчать про складність випробувань, за яких для отримання надійного й задовільного результату визначення ІВ потрібно виконати та опрацювати великий масив даних.

Знизити втрати часу на контроль стану герметичності і складність випробувань СГО під час визначення ІВ можливо тільки використанням надійних **нових методів** та засобів відповідно до вимог та рекомендацій нормативного документа [9].

Компенсаційний метод вимірювання витоку

У цій статті для визначення ІВ, як критерію герметичності СГО, пропонується компенсаційний метод визначення витоку (КМВВ) [10]. Останній дозволяє визначити ІВ прямим вимірюванням (на відміну від методу «абсолютного тиску») значно швидше і точніше. Далі наведено схему та принцип використання КМВВ. Зазначимо, що до верифікації нового методу мають використовуватися два методи одночасно. Це спричиняє необхідність продовження часу стабілізації параметрів для методу «абсолютного тиску», що може бути компенсовано удосконаленням технічних засобів проведення випробувань не тільки під час загальних випробувань СГО, а й у разі виявлення можливих місць локальних витоків.

Під час КМВВ вимірюється потік, який витікає з контрольної ємності (КЄ), а потім визначається ІВ з СГО за виразом:

$$L_{ГО} = L_{КЄ} \frac{V_{ГО}}{V_{КЄ}} \quad (3)$$

де $L_{ГО}$, $L_{КЄ}$ – витік повітря з СГО та контрольної ємності відповідно;

$V_{ГО}$, $V_{КЄ}$ – об'єм СГО та контрольної ємності.

За КМВВ інтегральний витік визначається урівноваженням маси повітря, що втрачається з СГО внаслідок витоку, та маси повітря, що нагнітається зовні. Ця рівновага відслідковується за зміною величини витоку з КЄ. У разі, якщо витік з КЄ дорівнює нулю, то вважається, що витік та нагнітання середовища з та в СГО однакові. Значення витоку визначається за показаннями витратоміра, який встановлюється на лінії подачі компенсаційного повітря до СГО. Задана похибка вимірювань досягається проведенням необхідної кількості вимірів та за необхідності використанням декількох КЄ.

Зупинимось більш детально власне на КМВВ. Ідея цього методу полягає в тому, що з витоком

середовища з СГО (навіть у дуже малих кількостях) обов'язково без затримки в часі відбувається відповідне зниження тиску в СГО [10], [11]. Отже, коли одночасно з витоком середовища з СГО забезпечити й подачу середовища до нього в наближеній кількості до очікуваного витoku, то можна очікувати компенсацію витoku в ті моменти часу, коли виток і подача середовища в СГО будуть однакові. Тобто, зниження тиску і його зростання під час вимірювання тиску будуть скомпенсовані, а тиск в СГО в момент заміру буде без змін. Наголошуємо, що це справедливим може бути тільки для відносно коротких інтервалів часу, коли процеси теплообміну в СГО не «встигають» за змінами тиску під час «витoku-подачі» середовища в СГО.

Залишається проблемною реєстрація вкрай малих змін тиску в СГО протягом малих інтервалів часу. Тут виявляється слушним, що у разі зрівняння дії «витoku-подачі» зміни тиску в СГО відсутні! Отже, треба в разі малих змін тиску в СГО визначати моменти відсутності перепаду тиску в певних локальних об'ємах СГО, а не вимірювати надто малі величини змін тиску. Користуючись цим принципом на Запорізькій АЕС був розроблений наприкінці минулого сторіччя цей новий компенсаційний метод визначення інтегрального витoku

з використанням нового приладу СІ-1 (індикатор відсутності перетікання середовища між локальними об'ємами СГО), схема якого зображена на рисунку 1 [11].

За наведеною схемою пряме визначення ІВ з СГО (як компенсація витoku) проводиться ротаметром поз. 5 у момент часу, коли відсутній перетік (у ту чи іншу сторону) повітря з СГО поз. 1 у контрольну ємність 3 (чи зворотно) по лінії 12-11-18-6-2-7-19-15-13-3, що візуально визначається індикатором 2. Цей момент часу може визначатися за малого нагнітання повітря в СГО. Площа діаграми під кривою зміни в часі подачі повітря для визначення ІВ з СГО може служити основою для визначення загальної кількості повітря, яке було введено в СГО під час пробної подачі.

Зазначимо, що під час подачі повітря в СГО порушується стабільність параметрів повітря в СГО за методом «абсолютного тиску». Тобто пробна подача повітря в СГО по лінії 5-14 на рисунку 1 (навіть у відносно малий інтервал часу) для визначення ІВ з СГО порушує стабілізований стан параметрів повітря в СГО. Коли потрібні одночасні випробування СГО двома методами, необхідна буде додаткова стабілізація параметрів повітря в СГО (а це певна затримка в часі випробувань), або

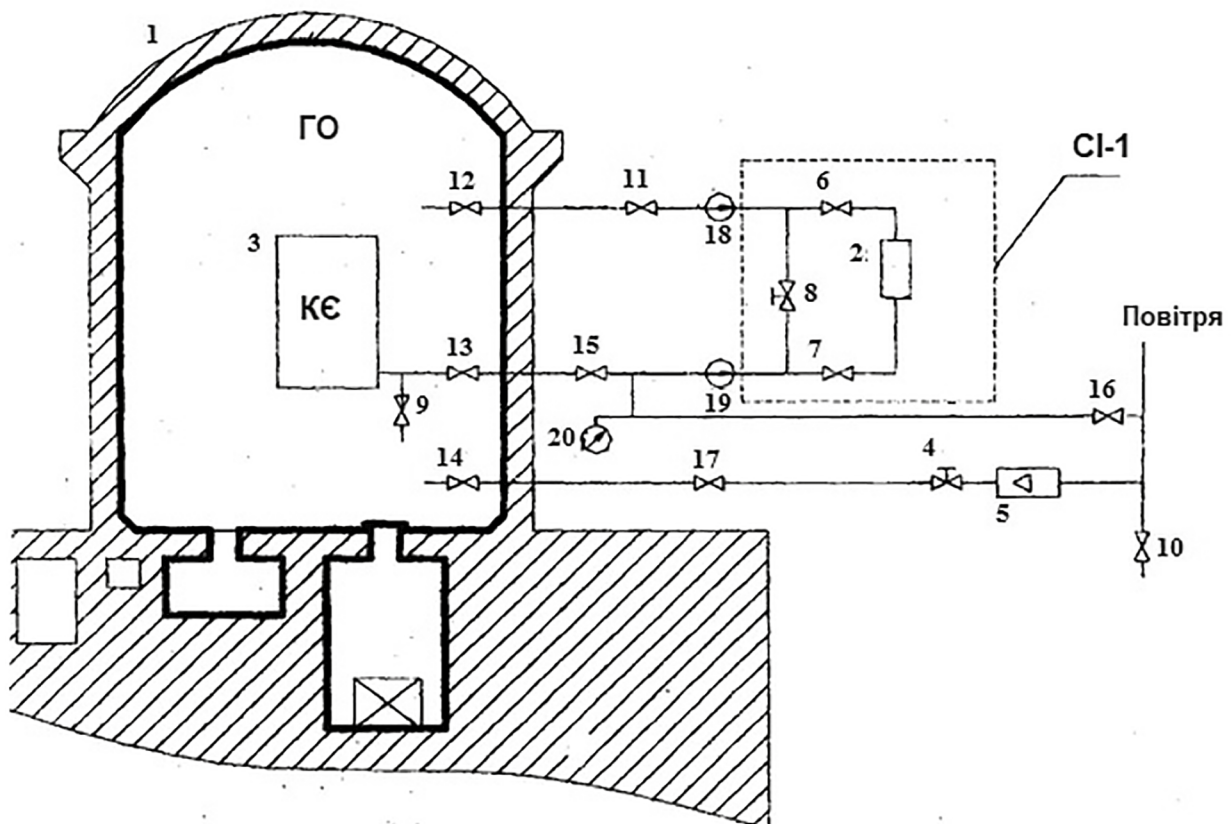


Рисунок 1 – Принципова схема визначення ІВ за компенсаційним методом з приладом СІ-1:

1 – гермооб'єм (СГО); 2 – індикатор перетікання; 3 – компенсаційна ємність (КЄ); 4 – вентиль регулювання; 5 – ротаметр; 6,7,8,9,10,11,12,13, 14, 15, 16, 17 – вентилі; 18,19 – штуцери на індикаторі; 20 – манометр (6 кгс/см²)

ж необхідна відповідна реконструкція технічних засобів, що потрібно передбачати на наступному етапі розробки цього методу.

Вимірювання здійснюються у такий спосіб. Відкривається вентиль 4 і через трубопровід з компресора до СГО подається повітря. За допомогою манометра 20 здійснюється контроль тиску в СГО. Через індикатор 2 потоку, повітря заповнює і КЄ 3. Водночас вторинний прилад індикатора демонструє наявність потоку газу з СГО 1 до КЄ 3. Під час досягнення випробуваного тиску вентиль 4 закривається, проводиться витримка, під час якої відбувається вирівнювання тиску між СГО 1 і КЄ 3, що фіксується стабільними показаннями індикатора потоку 2.

У разі відсутності витоку із замкнутого об'єму 1 прилад 2 фіксуватиме відсутність перетікання повітря між СГО і КЄ. Якщо після вирівнювання тиску індикатор 2 потоку буде демонструвати перетікання з КЄ до СГО, це буде свідчити про наявність витоку з СГО. Для його вимірювання відкривається вентиль 4 і повітря подається в СГО 1 через витратомір 5, який фіксує витрату повітря, що подається. З початком подачі повітря перепад тиску між СГО і КЄ та перетікання газу з КЄ до СГО почнуть зменшуватися. За допомогою вентиля 4 витрату газу, що подається, регулюють у такий спосіб, щоб індикатор 2 потоку показав спочатку відсутність перетікання, а потім наявність зворотного перетікання з СГО до КЄ. Потім витрату зменшують у такий спосіб, щоб індикатор потоку 2 знову показав відсутність перетікання, а потім появу зворотного напрямку з КЄ до СГО. За величину витоку приймають витрату повітря, що подається в СГО в періоди рівності тиску в СГО та КЄ.

Чим менша величина витоку, тим більше часу потрібно на її вимірювання. Тиск в СГО змінюється повільно. Тоді буде і повільний виток повітря з КЄ.

Кількість повітря, що подається, для зменшення часу визначення реального витоку має корелюватися з попередніми вимірами.

Визначимо кількість повітря, що має подаватися до СГО у процесі вимірювань. Для цього треба оцінити досягнутий рівень ІВ на блоці протягом останнього випробування. Так, наприклад, на 6-му блоці Запорізької АЕС під час передпускових випробувань ІВ склав 0,07 %. Це означає, що ІВ під час періодичних випробувань має бути $L_k < 1,15, L_{kr} < 1,15 \times 0,0007 \times 60000 = 48,3 \text{ м}^3/\text{доба} = 2,01 \text{ м}^3/\text{год} = 33,5 \text{ л/хв}$. Враховуючи, що

$$IB_{KE}/IB_{ГО} = V_{KE}/V_{ГО}$$

при об'ємі $V_{KE} = 1 \text{ м}^3$ та $V_{ГО} = 60000 \text{ м}^3$ отримаємо, що за цих параметрів витік з КЄ має бути:

$$IB_{KE} = 2,01 \times 1/60000 = 3,35 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{год} = 0,0335 \text{ л/год} = 33,5 \text{ мл/год} = 0,56 \text{ мл/хв}$$

Це дуже мала витрата для ідентифікації витоку. При $V_{KE} = 2 \text{ м}^3$ IB_{KE} буде дорівнювати 1 мл/хв.

Отже, у разі збільшення об'єму КЄ швидкість виходу повітря з КЄ зростає, що свідчить про те, що для кращої ідентифікації малих теч об'єм КЄ треба підвищувати.

Було розглянуто можливість вимірювання витоку безпосередньо на виході з КЄ. Для цього треба поставити витратомір на виході з приладу СІ-1 в напрямку до виходу в СГО. Перерахувавши отримане значення на об'єм СГО, отримаємо ІВ. Але враховуючи отримані значення витоку з КЄ, треба зробити висновок, що це практично неможливо через малу витрату 0,56-1,5 мл/хв навіть у разі збільшення об'єму КЄ до 3 м^3 .

Розглянемо один з варіантів вимірювань. У разі наявності течі повітря з СГО, тобто індикатор показує рух повітря з КЄ до СГО, здійснюють подачу повітря в СГО та спостерігають за обертанням індикатора. Подавати повітря до СГО до зупинки індикатора. Під час зупиненого індикатора фіксується значення витрати повітря витратоміром. Кількість вимірювань визначається величиною похибки та необхідністю досягти вірогідність отриманих значень 95 %.

Отже, оператор зміною подачі повітря до СГО досягає нерухомості індикатора 2, при тому здійснюється фіксація показання витратоміра 5, що є ІВ. Уявляється, що для отримання достатньої кількості значень потрібна приблизно одна година.

Провівши аналіз наведених нижче пропозицій: відсутність етапу вакуумування (проведення його за необхідності);

використання ежектора для підвищення витрати повітря, що нагнітається;

удосконалення розподілення повітря під час нагнітання;

використання КМВВ для визначення ІВ з СГО;

зменшення часу скидання тиску завдяки точному регулюванню засувки для забезпечення нормованої швидкості зниження тиску, можна зробити висновок, що загальний час випробувань у перспективі може скласти:

вакуумування	0 год.;
нагнітання	8 x 0,7 = 5,6 год.;
стабілізація параметрів	8 x 0,7 = 5,6 год.;
вимірювання	1 год.;
скидання тиску	0,72 год.
Загалом:	12,92 год.

Отже, у разі зменшення часу нагнітання, стабілізації та випробувань тривалість випробувань може бути скорочена на 16,58 год., тобто на $(29,5-12,92)/29,5 \times 100 = 56,2\%$. Зауважимо, що у разі повного переходу від методу «абсолютного тиску» до КМВВ можна буде повністю відмовитися від етапу стабілізації, оскільки тиск в СГО стабілізується практично одночасно. Витримка потрібна для

стабілізації температури, що під час безпосереднього вимірювання ІВ не має великого значення.

Зменшення тривалості проведення випробувань герметичності СГО сприяє підвищенню виробітку електроенергії на АЕС та отриманню додаткового прибутку, який за період додаткової роботи енергоблока протягом 16,58 год. приблизно складе:

$$16,58\text{-год.} \times 10^6 \text{ кВт} \times 0,7 \text{ грн./кВт-год} = \\ = 11,6 \text{ млн. грн/рік.}$$

Висновки

Надійність СГО, яка належить до локалізуючих систем безпеки, контролюється проведенням випробувань герметичності за методом «абсолютному тиску». ІВ з СГО визначається з розрахунків і є параметром узагальненим, який існуючими засобами реєстрації змін параметрів повітря в СГО визначенням бути не може. Тобто, за такого способу визначення ІВ досягається не за прямих вимірів, а розрахунковим методом – за визначеними змінами окремих параметрів середовища на відповідному ступені надлишкового тиску в СГО. Ще одним недоліком методу «абсолютного тиску» є також потреба у великій кількості приладів та часу.

З урахуванням досягнутого на сьогодні рівня герметизації СГО та елементів СЛА на АЕС методичні основи визначення ІВ з СГО за методом «абсолютного тиску» уже не відповідають досягнутому високому рівню герметичності СГО. До того найбільшою проблемою стає реєстрація вкрай малих змін тиску, бо на ці зміни впливають як процеси в СГО, так і коливання температури навколишнього середовища.

Розглянуто та проаналізовано використання КМВВ для визначення ІВ. Причому ІВ визначається безпосереднім вимірюванням та за менший час. За попередньою оцінкою тривалість проведення вимірювань за КМВВ має зайняти одну годину.

Проведено оцінку зменшення часу проведення випробувань на герметичність у перспективі через: відсутність етапу вакуумування (у разі відсутності крупних нещільнень СГО); використання ежектора для зменшення часу нагнітання повітря; реконструкцію системи подачі повітря для зменшення часу стабілізації параметрів; використання КМВВ для визначення ІВ. Підтверджено, що тривалість випробувань може бути зменшена на 16,5 годин (щонайменше на 56%). Це дасть можливість енергоблоку виробити додатково 16500 МВт-год./рік електроенергії.

Список використаної літератури

1. Nuclear containments: state-of-art report. Stuttgart: Fédération internationale du béton, 2001. 117 p. URL: https://books.google.com.ua/books?id=zG66DdKdAVEC&printsec=frontcover&hl=ru&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
2. Верхівкер Г. П., Кравченко В. П. Основы расчёта и конструирования ядерных энергетических реакторов. Одесса: ТЕС, 2008. 409 с.
3. Луговой П. З., Крицкий В. Б., Крицкая Н. И. Анализ динамического поведения и напряженно-деформированного состояния защитной оболочки реакторного отделения АЭС. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2016. № 3(71). С. 38-47. doi: 10.32918/nrs.2016.3(71).08.
4. НП 306.2.145-2008. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском. Затверджено наказом Держатомрегулювання України від 15.04.2008 № 73, зареєстровано в М-ві юстиції України 09.06.2008 за № 512/15203.
5. Программа проведения периодических испытаний системы герметичного ограждения на герметичность. 123456.РО.ХА.ПМ.27-19. Запорожская АЭС. 2019. 140 с.
6. Тодорцев Ю. К., Демченко В. А., Быченко Ю. Ю. Совершенствование методики испытания на плотность системы герметичного ограждения энергоблока с ВВЭР-1000. *Труды Одесского политехнического университета*. 2003. Вып. 1(19). С. 80-84.
7. Комаров Ю. А., Косенко С. И., Скалозубов В. И., Фольтов И. М. Методы оптимизации испытаний на герметичность системы гермооболочки реакторной установки в период ремонтных кампаний АЭС с ВВЭР-1000. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. Вип. 9. 2008. С. 15-22.
8. Kravchenko V., Vlasov A., Andryuschenko A., Vlasov D., Golovchenko A., Gavrilov P. Reduced air injection time during containment testing due to the use of an ejector. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2022. Issue 1(65). P. 5-12.
9. НП 306.2.218-2018 Правила улаштування та безпечної експлуатації локалізуючих систем безпеки. Затверджено наказом Держатомрегулювання від 03.04.2018 № 140, зареєстровано в М-ві юстиції України 27.04.2018 за № 534/31986.
10. Авторское свидетельство 1221043 СССР. Способ измерения интегральной утечки из герметичных объемов большой вместимости. От 1 июля 1990 г. Авторы: Хлесткин Д. А., Власов А. П., Царёв А. Н.
11. Кравченко В. П., Власов А. П., Власов Д. А., Поляшов С. В., Литвинов Б. А. Анализ способов и средств измерения интегральной утечки из защитной оболочки АЭС. *Технічне регулювання, метрологія, інформаційні та транспортні технології: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 14-15 листопада 2019 р.* Одеса, 2019. С. 56-62.

References

1. Nuclear containments: state-of-art report. — Stuttgart: Fédération internationale du béton, 2001. 117 p. Retrieved from: https://books.google.com.ua/books?id=zG66DdKdAVEC&printsec=frontcover&hl=ru&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
2. Verkhivker, G., Kravchenko, V. (2008). Fundamentals of calculation and design of nuclear power reactors. Odessa, TEC, 409 p.
3. Lugovoy, P., Krytskyi, V., Krytska, N. (2016). Analysis of the dynamic behavior and stress-strain state of the containment of the NPP reactor compartment under non-stationary impacts. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(71), 38-47. doi: 10.32918/nrs.2016.3(71).08.
4. NP 306.2.145-2008. Nuclear safety rules for reactor installations of nuclear power plants with pressurized water reactors. Approved by SNRIU Order No. 73 of 15 April 2008, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 9 June 2008 under No. 512/15203.
5. The program of periodic tightness testing of the containment. 123456.RO.KHA.PM.27-19. Zaporizhzhia NPP, 201, 140 p.
6. Todortsev, Yu., Demchenko, V., Bychenko, Yu. (2003). Improvement of the tightness test system of the containment for VVER-1000. *Efforts of the Odessa Polytechnic University*, 1(19), 80-84.
7. Komarov, Yu., Kosenko, S., Skalozubov, V., Foltov, I. (2008). Methods for optimizing tightness tests of the reactor containment system during the maintenance campaigns of NPPs with VVER-1000. *Problems of Safety of Nuclear Power Plants and Chornobyl*, 9, 15-22.
8. Kravchenko, V., Vlasov, A., Andryushenko, A., Vlasov, D., Golovchenko, A., Gavrilov, P. (2022). Reducing the air injection time during NPP containment tightness testing by using an ejector. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 1(65), 5-12.
9. NP 306.2.218-2018. Rules for the installation and safe operation of confining safety systems. Approved by SNRIU Order No. 140 dated 3 April 2018, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 27 April 2018 under No. 534/31986.
10. Khlestkin, D., Vlasov, A., Tsarev, A. Copyright certificate 1221043 of the USSR. A method of measuring the integral leakage from sealed volumes of large capacity. Of 1 July 1990.
11. Kravchenko, V., Vlasov, A., Vlasov, D., Polyashov, S., Litvinov, B. (2019). Analysis of methods and means for measuring the integral leakage from the containment of nuclear power plants. Technical regulation, metrology, information and transport technologies. *Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*, Odesa, November 14-15, 56-62.

State and Prospects of Containment Tightness Tests for VVER-1000 Reactor Installations

V. Kravchenko, A. Vlasov, A. Golovchenko, A. Mazurenko, V. Dubkovskiy, O. Chulkin

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

The containment is the fourth and last safety barrier against the release of radioactive elements and ionizing radiation into the environment in the event of an accident. A great attention is paid to its reliability: after each refueling outage or after each extraordinary depressurization of accident confinement means, the containment is tested for tightness. During these tests, the absolute pressure method is used at the NPPs of Ukraine. According to this method, as a result of measuring pressure, temperature and humidity of the air by the Mendeleev-Clapeyron equation, the air mass in the containment is determined. That is, the leakage is identified in an indirect way: by calculating the mass of air present in the volume for some time. Quite high tightness indicators have now been achieved, i.e., the integral leakage (IL) is sufficiently small and the methodological foundations of the tests should be improved. The complexity and long duration of the tests by the absolute method (more than a day) is an incentive to reduce the time of the tests. In the article, instead of the absolute pressure method, it is proposed to use a perspective compensatory method to determine the IL as a criterion for containment tightness. The latter allows determining IL from the containment by direct measurement much faster and more accurately. The scheme and principle of using the compensatory method with the help of a control tank are presented. The measurement technique is described. It is noted that the compensatory method requires the use of a device for measuring low air flow, which causes certain difficulties. It is noted that before the verification of the new method, two methods should be used simultaneously. All five stages of testing are analyzed. It is shown that due to the absence of the vacuuming stage (possibility of which should be confirmed by the planned schedule of air injection to the tight containment), the use of an ejector to reduce the injection time, compensatory measurement method and improvement of the air supply system to reduce the temperature stabilization time in the containment, the test time can be reduced by 56%.

Keywords: containment, tightness, integral leakage, methods for tightness testing.

Отримано 28.04.2023