

А. М. Головченко¹, В. В. Запорожан², І. В. Запорожан¹, В. П. Кравченко¹

¹ Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

² Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр» акціонерного товариства «НАЕК «Енергоатом», вул. Гоголівська, 22–24, 01054, м. Київ, Україна

Моделювання процесів у герметичному огороженні реакторної установки з ВВЕР-1000 під час випробувань на герметичність

Ключові слова:

герметичне огороження, випробування на герметичність, математична модель, скорочення часу стабілізації

Останнім бар'єром безпеки на шляху виходу радіоактивних елементів за умов аварії є герметичне огороження (ГО). Після кожного ремонту проводяться випробування ГО на герметичність. Тривалість випробувань може перевищувати добу. Метою статті є моделювання процесів у ГО реакторної установки з ВВЕР-1000, що дозволяє обґрунтовувати рекомендації щодо скорочення тривалості цих випробувань. У роботі розроблена математична модель стану середовища в ГО, яка складається з диференціальних рівнянь енергетичного, матеріального балансу та зміни температури в поглиначах теплоти. Верифікація моделі проведена співставленням результатів розрахунку з даними випробувань на 4-му блоці Рівненської АЕС. На етапі стабілізації параметрів розрахункова швидкість зміни температури практично співпадає з натурними даними. Для скорочення етапу стабілізації запропоновано регулювання температури повітря на виході з компресора за допомогою ежектора. Отримано, що при різниці температури повітря, що нагнітається, та температури в ГО 0,5 °C, стабілізація досягається за 30 хвилин.

Вступ

Для більшості типів АЕС обладнання першого контуру реакторної установки розташовують у спеціалізованих будівельних конструкціях, до яких застосовуються певні вимоги герметичності. Зокрема у ВВЕР-1000 контейнер має циліндричну форму з овальним дахом і належить до герметичного огороження (ГО). Після кожного планового-попереджувального ремонту (ППР) виконується випробування герметичності надлишковим внутрішнім тиском повітря та підтверджується надійність ГО визначенням інтегрального витоку (ІВ), що регламентується Правилами ядерної безпеки [1, п. 3.1.4].

Як зазначено у [2], випробування виконується в декілька етапів:

1. Вакуумування ГО для визначення місць нещільності та усунення пошкоджень — 4 години.
2. Нагнітання повітря до контрольного тиску. Визначення нещільності вузлів системи локалізації аварії (основного та допоміжного шлюзів, люку транспортного коридору та ін.) — 8 годин.
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.

Наведена тривалість етапів може суттєво відрізнятися для різних АЕС та енергоблоків.

Як видно, пришвидшення випробувань на герметичність позитивно позначиться на загальному терміні ППР, адже під час випробувань всередині контейнеру

© А. М. Головченко, В. В. Запорожан, І. В. Запорожан, В. П. Кравченко, 2023

мента припиняються всі роботи. Вочевидь за рахунок збільшення продуктивності компресорного обладнання можна скоротити час етапу підвищення тиску, але не зрозуміло, як це вплине на етап стабілізації параметрів. Тому для детального розуміння механізму процесів, що відбуваються в ГО, та визначення певних залежностей необхідно розробити математичну модель процесів у середовищі ГО за умов випробувань.

Метою цієї роботи є розробка математичної моделі процесів, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність, задля визначення факторів, які впливають на тривалість вимірювання ІВ із захисної оболонки та його кількісної оцінки.

У [3] наводиться аналіз можливих шляхів зниження тривалості кожного етапу. Ця робота присвячена удосконаленню етапу стабілізації параметрів.

Процеси, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність

Насамперед визначимо, що вологість повітря в ГО не досягає 100 % за весь час випробувань. Тобто немає потреби розглядати процес утворення туману. Це пояснюється умовами до якості повітря, що нагнітається, а саме до вологості та вмісту пилу. Для цього на всмоктуванні компресора встановлено фільтр для очищення від пилу, а на виході — засіб для осушення повітря. Треба відмітити, що компресор має внутрішнє охолодження, що суттєво знижує теоретичну температуру повітря, яка б мала бути під час стиснення повітря до визначеного тиску.

Для зручності розглянемо одразу етап нагнітання повітря в ГО (на інших етапах відбуватимуться фактично ті ж самі процеси). Так, повітря в ГО потрапляє від компресорної станції, де стискається до відповідного тиску, а потім охолоджується й осушується. Зауважимо, що охолоджене повітря має дещо вищу температуру, ніж температура в ГО. У зв'язку з цим під час нагнітання повітря в ГО відбувається розігрів середовища не тільки за рахунок збільшення тиску. Збільшення різниці температур між атмосферою і поверхніми обладнання ГО спричиняє інтенсифікацію процесу теплообміну між повітрям і конструкціями контейнера. У свою чергу теплота, отримана поверхнею обладнання, розповсюджується у внутрішні шари матеріалу (пасивного «поглинача» тепла).

Кількість теплоти, що підводиться стисненням повітрям до атмосфери ГО, є практично сталою величиною, оскільки витрата й параметри середовища після компресора впродовж нагнітання змінюються

на незначний відсоток (менше 1 %) [4]. При цьому кількість теплоти, що поглинається обладнанням у ГО, навпаки, є змінною величиною, яка залежить від різниці температур між повітрям і поверхнею «поглиначів» тепла. Зокрема, на цю залежність мають вплив такі фактори, як режим циркуляції повітря (природної) вздовж поверхні «поглиначів» та теплофізичні властивості матеріалу «поглиначів». Відзначимо, що саме процес поглинання тепла обладнанням ГО має вирішальне значення на етапі стабілізації параметрів після вимкнення компресора.

Крім вищезазначеного, необхідно взяти до уваги наявність басейну витримки. Так, відкрита поверхня води, за умов відключеної системи вентиляції і кондиціювання, може впливати на стан атмосфери ГО, зокрема на вологість повітря.

Математичний опис процесу, що відбувається в ГО, проводиться за таких припущень:

усі процеси термодинамічно рівноважні;

процес розглядається в нуль-вимірному наближенні, тобто змінами характеристик пароповітряної суміші в просторі нехтуємо;

усі пасивні поглиначі тепла на початку процесу рівномірно прогріті й мають однакову з повітрям температуру;

пасивні поглиначі тепла одновимірні, тобто розповсюдження тепла відбувається тільки вглиб шарів матеріалу;

пасивні поглиначі тепла умовно розділені на два типи: герметичне огороження, що складається з пофарбованого шару металевих облицювання (8 мм) та бетону, а також внутрішні будівельні конструкції, що складаються з пофарбованого бетону.

Розглянемо процеси, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність, використовуючи 1) енергетичний баланс, 2) матеріальний баланс, 3) нестационарну теплопровідність.

1. Швидкість зміни маси ($M_{ГО}$) пароповітряної суміші в ГО опишемо рівнянням

$$\frac{dM_{ГО}}{dt} = G_{П.ВХ} - G_{Г.ВХ} + G_{Г.ВХ} + G_{П.БВ} - G_{П.К} - G_{Т.О.}, \quad (1)$$

де $G_{Г.ВХ}$ — витрата повітря, що надходить у ГО; $G_{Г.Вих}$ — витрата повітря, що виходить із ГО; $G_{П.ВХ}$ — витрата пари, що надходить у ГО; $G_{П.Вих}$ — витрата пари, що виходить із ГО; $G_{П.БВ}$ — витрата пари, що утворюється на поверхні басейну витримки (БВ); $G_{П.конд}$ — витрата пари, що конденсується на стінках та обладнанні ГО.

2. Швидкість зміни кількості енергії ($Q_{ГО}$) пароповітряної суміші в ГО описується співвідношенням

$$\frac{dQ_{\Gamma O}}{dt} = Q_{\Pi, \text{BX}} + Q_{\Gamma, \text{BX}} + Q_{\Pi, \text{BB}} + Q_{\Pi, \text{ВИХ}} - Q_{\Gamma, \text{ВИХ}} - Q_{\Pi, \text{К}} - Q_{\text{Т.О.}}, \quad (2)$$

де $Q_{\Pi, \text{BX}} = G_{\Pi, \text{BX}} \cdot i_{\Pi, \text{BX}}$ — енергія, що надходить від компресора в ГО за одиницю часу з парою; $Q_{\Gamma, \text{BX}} = G_{\Gamma, \text{BX}} \cdot i_{\Gamma, \text{BX}}$ — енергія, що надходить від компресора в ГО за одиницю часу з повітрям; $Q_{\Pi, \text{BB}} = G_{\Pi, \text{BB}} \cdot i_{\Pi, \text{BB}}$ — енергія, що надходить у ГО за одиницю часу з парою, яка утворилась на поверхні БВ; $Q_{\Pi, \text{ВИХ}} = G_{\Pi, \text{ВИХ}} \cdot i_{\Pi}$ — енергія, що забирається з ГО за одиницю часу парою, яка виходить через нещільність; $Q_{\Gamma, \text{ВИХ}} = G_{\Gamma, \text{ВИХ}} \cdot i_{\Gamma}$ — енергія, що забирається з ГО за одиницю часу повітрям, яке виходить через нещільність; $Q_{\Pi, \text{К}}$ — енергія, що забирається з ГО за одиницю часу парою, яка конденсується на стінах та обладнанні; $Q_{\text{Т.О.}}$ — енергія, що забирається/підводиться з ГО за одиницю часу за рахунок теплообміну середовища зі стінами та обладнанням ГО, тобто витрачається пароповітряною сумішшю на нагрів стін та обладнання ГО; i — ентальпія пари/повітря відповідно до параметрів.

3. Зміна температури (T) у часі (τ) за шарами (x) матеріалу пасивних поглиначів теплоти в умовах нестационарної теплопровідності описується одновимірним рівнянням [5, 6]:

$$\frac{dT}{d\tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ — коефіцієнт температуропровідності;

λ — коефіцієнт теплопровідності; c — теплоємність; ρ — густина.

Під час розв'язання диференціального рівняння використано такі граничні умови (умови однозначності) [5, 6]:

для поверхонь, що контактують з атмосферою ГО — третього роду, де коефіцієнт тепловіддачі ($\alpha_{\text{Т.В.}}$) розраховувався за умов природньої циркуляції повітря вздовж пласкої поверхні;

для глибинного (неповерхневого) шару ГО — першого роду.

Вибір граничної умови для ГО потребує певних пояснень. На перший погляд, контайнмент із зовнішньої сторони мав би контактувати з навколишнім середовищем, але це не стосується всієї конструкції. До того ж, більша частина контайнмента із зовнішньої сторони знаходиться в оббудові реакторного відділення, де в приміщеннях підтримується комфортна для роботи персоналу температура. Крім того, у стінці та куполі захисної оболонки розміщені попередньо напружені сталеві троси, які проходять у спеціальних

каналах [3, 7]. Зазначені канали беруть початок в оббудові і, відповідно, всередині них проходить повітря з температурою середовища оббудови. Тобто можна стверджувати, що в глибинному шарі захисної оболонки підтримується майже незмінна температура.

Зазначимо, що як пасивні поглиначі тепла розглядалися тільки будівельні конструкції. При цьому окремо розраховувалися контайнмент і бетонні перегородки, які формують приміщення ГО. Впливом іншого обладнання ГО можна було знехтувати, оскільки майже все теплотехнічне обладнання обгорнуте теплоізоляцією з алюмінієвим облицюванням, яке споживає/віддає замало тепла порівняно з будівельними конструкціями.

Зв'язок між рівняннями (2) і (3) забезпечується величиною $Q_{\text{Т.О.}}$, яка визначається за допомогою рівняння Ньютона — Ріхмана [5]:

$$\frac{Q_{\text{Т.О.}}}{F} = q = \alpha_{\text{Т.В.}} (T_{\Gamma} - T_{\text{СТ}}), \quad (4)$$

де q — щільність теплового потоку на поверхні теплообміну; F — площа поверхні теплообміну; T_{Γ} — температура пароповітряної суміші; $T_{\text{СТ}}$ — температура поверхні поглинача тепла, розраховується рівнянням (3).

Слід зауважити, що рівняння (4) наведене в загальному вигляді. Тобто для кожного пасивного поглинача тепла величина $Q_{\text{Т.О.}}$ розраховується окремо, а в рівнянні (2) використовується їхня сума.

Останнім чинником, який враховується в моделі, є випаровування пари з басейну витримки. Виділення води ($G_{\Pi, \text{БВ}}$) з поверхні води згідно з методикою Danterm [8] враховують за рівнянням

$$G_{\Pi, \text{БВ}} = e \cdot S (P_{\text{нас}} - P_{\text{вст}}),$$

де $P_{\text{нас}}$ — тиск водяних парів насиченого повітря за заданої температури води в басейні; $P_{\text{вст}}$ — парціальний тиск водяних парів за заданими вологістю і температурою; S — площа поверхні води в басейні; e — емпіричний коефіцієнт, залежить від стану поверхні води (спокій, хвиля тощо).

Зазначимо, що наведене вище рівняння (1) є загальним для пароповітряної суміші. Тому для проведення розрахунку воно було розділено на два окремі рівняння — для пари і повітря (згідно з виразом

$$\frac{dM_{\Gamma O}}{dt} = \frac{dM_{\Gamma}}{dt} + \frac{dM_{\Pi}}{dt}.$$

Далі з (1) та (2) було отримано систему рівнянь відносно трьох параметрів: T_{Γ} — температури пароповітряної суміші (температура пари дорівнює тем-

пературі повітря); P_{Γ} — парціального тиску газової складової повітря; P_{Π} — парціального тиску пари.

У загальному вигляді система рівнянь відповідає виразу

$$\begin{pmatrix} a_{1.1} & a_{2.1} & a_{3.1} \\ a_{1.2} & a_{2.2} & a_{3.2} \\ a_{1.3} & a_{2.3} & a_{3.3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dT_{\Gamma}}{dt} \\ \frac{dP_{\Gamma}}{dt} \\ \frac{dP_{\Pi}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де a_{ij} — коефіцієнти при відповідних невідомих; a_i — вільні члени рівнянь.

Методи вирішення системи диференціальних рівнянь

Рішення системи диференціальних рівнянь (5) методом Рунге — Кутти — Фельберга [9] дозволило уникнути осциляцій, оскільки в метод закладено автоматичний вибір кроку. Попередньо задається максимальне значення кроку, яке в умовах автоматичного вибору не перевищується. У кожній точці аргументу (часу) робиться подвійний прорахунок значення функції, спочатку з повним кроком, потім із половиною кроку. Якщо отримані при цьому значення функції різняться в межах допустимої точності, то крок для наступної точки подвоюється (повернення до повного кроку). Зазначимо, що попередньо виконувалась обробка матриці методом Гаусса [10].

Рівняння (3) вирішувалось за явною схемою рішення рівнянь другого порядку в часткових похідних методом кінцевих різниць [10, 11].

Аналіз отриманих результатів і порівняння їх із експериментальними даними

За експериментальні дані прийняті результати вимірювань основних параметрів газового середовища ГО енергоблока Рівненської АЕС у процесі проведення випробування на герметичність ГО від 24.01.2022 р. Судячи з наведених даних, перші півтори години випробувань виконувалось прогрівання, опробування і налаштування обладнання компресорної станції, тому як початкові значення для розрахунку вибрано параметри середовища, які відповідають значенням на цей момент часу (1,5 години від початку натурних випробувань). Зазначимо, що, крім дій у перші півтори години, невизначеною також

є температура повітря від компресора на вході в ГО. Але ці та інші невизначеності були усунуті шляхом підбору вхідних даних та налаштування моделі.

У результаті розрахунку отримано динаміку зміни тиску (рис. 1) і температури (рис. 2) пароповітряної суміші в ГО. Як видно з наведених даних, розрахункові й експериментальні параметри мають незначні відмінності, що дозволяє стверджувати про коректність розробленої моделі.

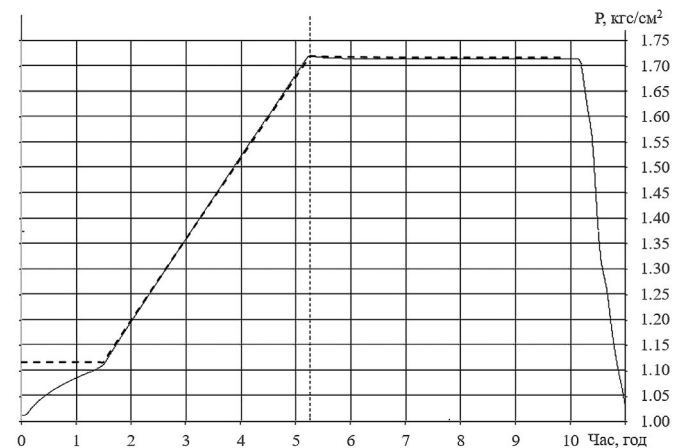


Рис. 1. Динаміка зміни тиску пароповітряної суміші в ГО протягом випробувань на герметичність
— натурні випробування, --- моделювання

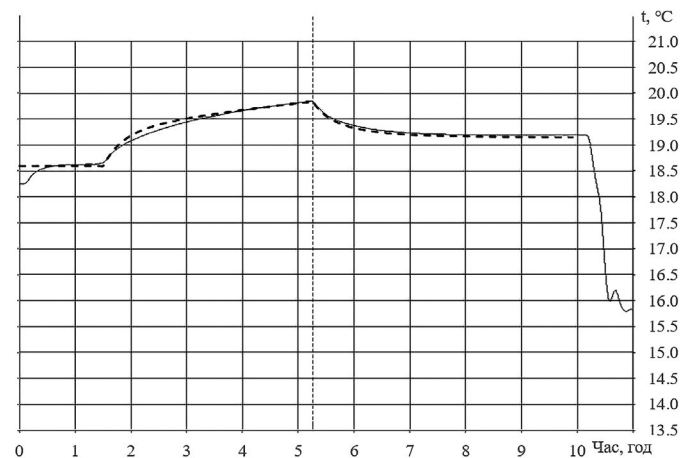


Рис. 2. Динаміка зміни температури пароповітряної суміші в ГО протягом випробувань на герметичність
— натурні випробування, --- моделювання

Крім зазначених показників, найважливішим є показник швидкості зміни температури (рис. 3), оскільки саме цей параметр слугує критерієм стабілізації. Так, за умов досягнення швидкості зміни температури значень від $-0,02$ до $0,02$ °C/год починає проводитися вимірювання інтегрального витоку.

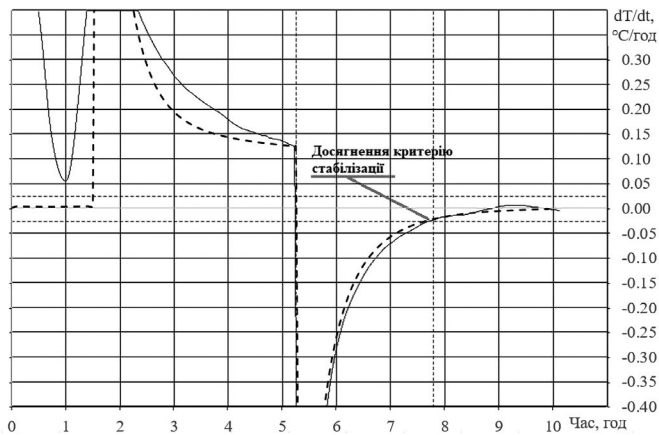


Рис. 3. Швидкість зміни температури пароповітряної суміші в ГО
 — натурні випробування, --- моделювання

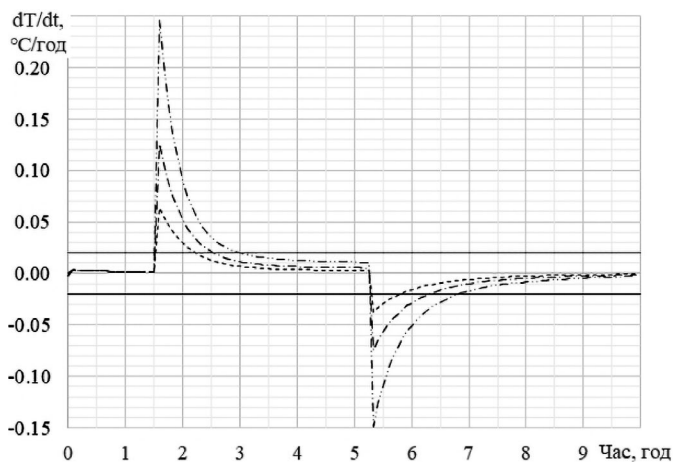


Рис. 4. Швидкість зміни температури пароповітряної суміші в ГО за умов зменшення різниці температур (Δt) між обладнанням ГО і повітрям, що нагнітається
 — $\Delta t = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; --- $\Delta t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; — · — $\Delta t = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Відповідно, чим швидше відбувається досягнення зазначеного діапазону, тим менше часу витрачається на випробування в цілому. Досягнути повного відтворення моделлю зазначеного показника не вдалось у зв'язку з тим, що в моделі не враховуються зміни характеристик пароповітряної суміші в просторі (процес розглядається в нуль-вимірному наближенні). Також є певні невизначеності початкового стану поглиначів тепла, зокрема температурного поля в матеріалі. Загалом це стосується тільки етапу нагнітання повітря до контрольного тиску. У процесі стабілізації параметрів швидкість зміни температури близька до натурних даних.

Вочевидь одним із шляхів скорочення терміну проведення випробувань є регулювання температури

повітря на вході в ГО. За можливості її регулювання треба забезпечити, щоб температура повітря від компресора дорівнювала температурі середовища в ГО (температурі обладнання). Це надає можливість пришвидшити досягнення критерію стабілізації.

На рис. 4 наведено результати розрахунку зміни температури в ГО за умови перевищення температури повітря, що нагнітається, над температурою в ГО на 0,5, 1 та 2 $^{\circ}\text{C}$. З аналізу наведених даних можна зробити висновок, що критерій стабілізації при $\Delta t = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ досягається за 0,5 год, при $\Delta t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ термін етапу стабілізації дорівнює 1 год, а при $\Delta t = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 1,5 год. Водночас за результатами випробувань стабілізація настала через 2,6 год. Тобто регулювання температури повітря на виході компресора може дати в цьому випадку скорочення часу випробувань на 2,1 год.

Цей захід можна реалізувати шляхом домішування більш прохолодного повітря до основного потоку, наприклад, встановивши ежектор у напірному повітропроводі. Тоді до потоку буде додаватися деякий об'єм повітря, що сприятиме більш швидкому досягненню контрольного тиску в ГО, за яким настає етап стабілізації параметрів. Зауважимо, що збільшення вологості потоку на вході в ГО не має значного впливу на перебіг процесу в цілому, але додає питання щодо «випадання» вологи в частині повітропроводу за ділянкою, де домішується холодне повітря. Крім цього, необхідно вирішити питання чистоти повітря, яке додається. Обидва завдання можуть бути вирішені інженерними заходами.

Висновки

Розроблено математичну модель процесів, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність та підтверджено її коректність. Модель дозволяє проводити перевірку ефективності заходів щодо скорочення часу випробувань.

Розрахунково показано, що ефективним методом скорочення часу проведення випробувань є регулювання температури повітря, яке нагнітається компресором у ГО.

Список використаної літератури

1. 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.

2. 123456.PO.XA.ПМ.27–19. Програма проведення періодичних испытаний системи герметичного огороження на герметичність. — Запорожская АЭС, 2019. — 140 с.
3. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність / В. П. Кравченко, А. П. Власов, А. М. Головченко [та ін.] // Ядерна та радіаційна безпека. — 2023. — № 2 (98). — С. 53–60. — doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05.
4. Reducing the air injection time during NPP containment tightness testing by using an ejector / V. Kravchenko, A. Vlasov, A. Andryuschenko // Proceedings of Odessa Polytechnic University. — 2022. — Vol. 1 (65). — P. 5–12.
5. Юшко С. В. Нестационарна теплопровідність: навч. Посіб / С. В. Юшко, О. Є. Борщ, Г. І. Токар. — Харків : НТУ «ХПІ», — 2012. — 112 с.
6. Новиков И. И. Прикладная термодинамика и теплопередача. Изд. 2-е. / И. И. Новиков, К. Д. Воскресенский. — Москва : Атомиздат, 1977. — 352 с.
7. Луговой П. З. Анализ динамического поведения и напряженно-деформированного состояния защитной оболочки реакторного отделения АЭС / П. З. Луговой, В. Б. Крицкий, Н. И. Крицкая // Ядерна та радіаційна безпека. — 2016. — № 3 (71). — С. 38–47. — doi.org/10.32918/nrs.2016.3(71).08.
8. VDI 2089. Building services in swimming baths. Verein deutscher ingenieure. — 2011.
9. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. 2-е изд., перераб. и доп. / Е. П. Попов. — Москва : Наука, 1989. — 304 с.
10. Киреев В. И. Численные методы в примерах и задачах: учеб. пособие / В. И. Киреев, А. В. Пантелеев. — Москва : Высш. шк., 2006. — 480 с.
11. Тимейчук О. Ю. Математичні моделі та оптимізація тепломасообміну: навчальний посібник / О. Ю. Тимейчук. — Рівне : НУВГП, 2010. — 50 с.

**A. M. Holovchenko¹, V. V. Zaporozhan²,
I. V. Zaporozhan¹, V. P. Kravchenko¹**

¹ Odesa National Polytechnic University, 1, Shevchenko ave, Odesa, 65044, Ukraine

² Separate Subdivision “Scientific and Technical Center” of the JSC “NNEGC ‘Energoatom’”, 22–24, Hoholivska st., 01054, Kyiv, Ukraine

Simulation of Processes in the Containment of the VVER-1000 Reactor Facility During Leak Tests

The last barrier to the release of radioactive elements into the environment in the event of an accident at a nuclear power plant is hermetic fencing (HF). After each scheduled preventive repair, leak tests are carried out to confirm the ability of the system to perform its functions. The tests consist of five stages (vacuuming, air injection, parameter stabilization, integral leakage measurement and pressure relief). A mathematical model of the state of the environment in the HF is developed, which consists of differential equations of energy balance, material balance and temperature change in materials of passive heat absorbers at non-stationary thermal conductivity. The model takes into account the evaporation of steam from the spent fuel pool. The system of differential equations is solved by the Runge–Kutta–Fehlberg method. The adequacy of the model was checked on the basis of comparison of the calculation results with the data of the test report of the HFS at the 4th unit of the Rivne NPP. In the process of stabilizing the parameters, the rate of temperature change almost coincides with the full-scale data. To shorten the stabilization stage, it is proposed to regulate the air temperature at the outlet of the compressor through the use of an ejector, which will suck in the required amount of ambient air with a lower temperature. It is shown that with a difference between the temperature of the discharged air and the temperature in the HF of 0.5 °C, stabilization is achieved in 30 minutes.

Keywords: hermetic fencing system, leak test, mathematical model, reduction of parameter stabilization time.

References

1. NP 306.2.145–2008. *Rules for Nuclear Safety of Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors*. Approved by SNRIU Order no. 73, dated 15.04.2008. Kyiv: SNRIU, 2008. (in Ukr.)
2. *A program for periodic leak testing of the hermetic enclosure system*. 123456.PO.XA.ПМ.27–19. Zaporizhzhia NPP, 140 p. (in Rus.)
3. Kravchenko V. P., Vlasov A. P., Holovchenko A. M., Mazurenko A. S., Dubkovsky V. O., Chulkin O. O. (2023). [Status and prospects of testing the hermetic enclosure system of the reactor plant with VVER-1000 for tightness]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 98, no. 2, pp. 53–60. doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05 (in Ukr.)
4. Kravchenko V., Vlasov A., Andryuschenko A., Vlasov D., Holovchenko A., Gavrilo P. (2022). Reducing the air injection time during NPP containment tightness testing by

- using an ejector. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, vol. 1 (65), pp. 5–12.
5. Yushko S. V., Borshch O. E., Tokar G. I. (2012). *Nestatsionarna teploprovodnist* [Unsteady thermal conductivity: teaching manual]. Kharkiv: NTU “KhPI”. 112 p. (in Ukr.)
6. Novikov I. I., Voskresenskiy K. D. (1977). *Prikladnaya termodinamika i teploperedacha* [Applied thermodynamics and heat transfer (2nd ed.)]. Moscow: Atomizdat, 352 p. (in Rus.)
7. Lugovoy P. Z., Kritskiy V. B., Kritskaya N. I. (2016). [Analysis of the dynamic behavior and stress-strain state of the reactor building containment shell of a nuclear power plant]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 71, no. 3, pp. 38–47. doi.org/10.32918/nrs.2016.3(71).08. (in Rus.)
8. VDI 2089. *Building services in swimming baths*. Verein deutscher ingenieure. 2011.
9. Popov E. P. (1989). *Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Theory of linear automatic control systems (2nd ed., rev. and enl.)]. Moscow: Nauka, 304 p. (in Rus.)
10. Kireyev V. I., Panteleyev A. V. (2006). *Chislennyye metody v primerakh i zadachakh* [Numerical methods in examples and problems (2nd ed.)]. Moscow: Vyshcha shkola, 480 p. (in Rus.)
11. Tymeichuk O. Y. (2010). *Matematychni modeli ta optymizaciya teplomasoobminu* [Mathematical models and optimization of heat and mass exchange] Rivne: NUWEE, 50 p. (in Ukr.)

Надійшла: 23.12.2023

Received: 23.12.2023