



УКРАЇНА

(19) UA (11) 57947 (13) U
(51) МПК (2011.01)
G01T 1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ДІАГНОСТИКИ КРИЗОВОГО СТАНУ АКТИВНОЇ ЗОНИ РЕАКТОРА

1

2

(21) u201009113

(22) 20.07.2010

(24) 25.03.2011

(46) 25.03.2011, Бюл.№ 6, 2011 р.

(72) КАЧУР СВІТЛАНА ОЛЕКСАНДРІВНА

(73) СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ПРОМИС-
ЛОВОСТІ

(57) Спосіб діагностики кризового стану активної зони реактора, який **відрізняється** тим, що в ньому спрощують процедуру розрахунку параметрів процесу теплообміну в активній зоні реактора, а також здійснюють прогнозування параметрів процесу теплообміну і визначають значення параметрів кризи теплообміну в активній зоні до початку поверхневого кипіння.

Корисна модель відноситься до галузі атомної енергетики і може бути використана при розробці систем діагностики внутрішньо реакторних аномалій і систем адаптивного керування тепловою потужністю ядерного реактора типу ВВЕР.

Механізми кризи тепловіддачі в каналах значною мірою визначаються режимами перебігу двофазної суміші, недогріванням рідини до температури насичення і густиною теплового потоку [1]. Інтерпретація дослідних даних і форма опису їх емпіричними рівняннями викликають певні труднощі. Традиційним є надання дослідних даних у координатах $q_{кр}(x_{кр})$ (де $q_{кр}$ - критична густина теплового потоку, $x_{кр}$ - критичний масовий паровміст), при якому необхідно $x_{кр}$ обчислити з рівняння теплового балансу, що зв'язане з додатковими помилками. Крім того, завдання не термінального адаптивного керування тепловою потужністю ядерного реактора щодо квадратичного критерію припускає наявність прогнозованого вектора стану системи (вектора теплової потужності каналів активної зони), який неможливо отримати, використовуючи існуючі теплофізичні і термодинамічні моделі.

Суть корисної моделі полягає в підвищенні швидкодії діагностики стану активної зони ядерного реактора за рахунок спрощення процедури розрахунку параметрів процесу теплообміну, а також в підвищенні якості оцінки стану реактора за рахунок прогнозування параметрів процесу теплообміну і визначення значення параметрів кризи теплообміну в активній зоні до початку поверхневого кипіння.

Технічний результат досягається завдяки розробці моделі, що описує динаміку поведінки ядерного реактора в умовах невизначеності на основі

інформації про процес теплообміну в технологічних каналах активної зони.

Діагностика кризового стану активної зони реактора полягає в розробці способу графоаналітичного прогнозування процесу кризового стану запарювання каналу активної зони реактора ВВЕР, яка включає побудову моделі, що відображає динаміку поведінки ядерного реактора в умовах невизначеності, характерних для нештатних ситуацій.

Для діагностики і прогнозування стану процесу теплообміну в активній зоні ядерного реактора досить знати значення таких параметрів поточного процесу в кожному каналі: а) температури теплоносія на виході каналу Т; б) тиск у першому контурі Р; в) температури пального Т_у у верхній частині даного каналу; г) питому густину теплового потоку q; д) акустичні спектральні характеристики і температурні характеристики до початку кипіння [2].

Як основу графоаналітичної моделі вибрано Т-*s* діаграму (залежність температури теплоносія від питомої ентропії) [3], як таку, що найповніше відображає термодинамічний процес перетворення енергії. Відмінність процесу підведення теплоти для теплового двигуна або ядерного реактора в проектному режимі і ядерного реактора позаштатної ситуації на Т-*s* діаграмі показано, відповідно, на фіг. 1(а) і фіг. 1(б), де:

s - питома ентропія технологічного каналу;

Т - температура теплоносія на виході каналу;

q - питома густина теплового потоку;

(А, D) - точки робочої прямої, що відображає тенденцію запарювання технологічного каналу активної зони реактора

Етапи побудови графоаналітичної моделі:

(19) UA (11) 57947 (13) U

1. Аналіз взаємозв'язку між питомою ентропією s системи і експериментальними акустичними спектральними характеристиками. У діапазоні частот $f=2\div5$ кГц до початку поверхневого кипіння при відповідному нормуванні всі характеристики мають один нахил, що визначає значення коефіцієнта

$$B \frac{\Delta q}{\Delta A} \cdot k_{\text{норм}} = \frac{\Delta q}{\Delta T},$$

де ΔA - зміна амплітуди спектральної густини флуктуації акустичного шуму при зміні питомої густини теплового потоку Δq ;

ΔT - зміна температури теплоносія на виході каналу при зміні Δq ;

Δq - зміна питомої густини теплового потоку;

$k_{\text{норм}}$ - коефіцієнт нормування, залежний від конструктивних особливостей конкретного реактора.

З рівняння теплового балансу, провівши нескладні перетворення, і

$$\text{приймаючи } \frac{\Delta G}{G} = -\frac{\Delta \alpha}{1-\alpha} \quad [4], \text{ урахувавши отри-}$$

мане вище співвідношення, отримаємо

$$\Delta q = C \cdot G \cdot \Delta T \Rightarrow \frac{\Delta q}{\Delta T} = C \cdot G \equiv B,$$

$$\Delta q = \Delta G \cdot C \cdot T \Rightarrow \frac{\Delta q}{T} = \Delta G \cdot C = \frac{\Delta G}{G} \cdot G \cdot C = -\frac{\Delta \alpha}{1-\alpha} B$$

де q - питома густина теплового потоку;

T - температури теплоносія на виході каналу;

G - масова витрата теплоносія;

C - питома теплоємність;

α - об'ємний паровміст;

$\Delta \alpha$ - зміна об'ємного паровмісту, що викликає зміну масової витрати теплоносія ΔG .

Зміну питомої ентропії Δs визначають таким чином

$$\Delta s = \frac{\Delta q}{T} = -\frac{\Delta \alpha}{1-\alpha} B.$$

Із цього співвідношення виходить, що максимальна зміна питомої

$$\text{ентропії буде при } \frac{\Delta \alpha}{1-\alpha} = 1 \text{ мати величину}$$

$$\Delta s_{\text{max}} = B.$$

2. Визначення температури $T_{\text{ПК}}$ початку поверхневого кипіння, аналізуючи температурні характеристики до початку кипіння і враховуючи функціональну залежність температури кипіння від тиску $T_s = f(P)$. Причому поточна інформація про процес дозволяє визначити залежність температури теплоносія від часу $T = f_1(t)$ на малому інтервалі часу Δt .

$$\Delta T = T_f - T_s,$$

$$T_{\text{ПК}} = T + \Delta T.$$

3. Побудова робочої прямої на T - s діаграмі (фіг. 2,а). Робоча пряма визначається двома точками: точкою початку кипіння (точка А) і критичною точкою (точка D). Точка А визначається перетином T - s діаграми з прямою $T = T_{\text{ПК}}$, а точка D - перетином T - s діаграми з прямою $s = s_{\text{ПК}} + B$. За відсутності зовнішніх дій зміна параметрів процесу теплообміну відповідає руху по робочій прямій.

Рівняння робочої прямої має вигляд

$$T(s) = \frac{T_{\text{КК}} - T_{\text{ПК}}}{s_{\text{КК}} - s_{\text{ПК}}} (s - s_{\text{ПК}}) + T_{\text{ПК}},$$

де $T_{\text{ПК}}$ - температури початку поверхневого кипіння;

$T_{\text{КК}}$ - температура точки К на T - s діаграмі;

$s_{\text{ПК}}$ - питома ентропія початку поверхневого кипіння;

$s_{\text{КК}}$ - питома ентропія точки К на T - s діаграмі.

4. Прогнозування об'ємного паровмісту α при поверхневому кипінні ($T_{\text{ПК}} < T < T_s$) у разі зміни температури теплоносія на ΔT . З рівняння прямої для $T = T_{\text{ПК}} + \Delta T$ визначають $\Delta s = s - s_{\text{ПК}}$. Після нескладних перетворень, приймаючи $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_{\text{ПК}}$, ос обчислюється за формулою

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{ПК}} + \frac{\Delta s}{B}}{1 + \frac{\Delta s}{B}},$$

Значення $\alpha_{\text{ПК}}$ визначають у відповідності з формулою [1]

$$\alpha_{\text{ПК}} = 1,17q^{0,35}/P^{0,15}(\rho w)^{0,15},$$

де ρw - масова швидкість.

5. Прогнозування масового паровмісту у разі зміни температури теплоносія на ΔT . Використовуючи співвідношення для зони поверхневого кипіння ($x_0 < x < 0$, $T_{\text{ПК}} < T < T_s$) у відповідності з [1],

$$\alpha = \alpha_{\text{ПК}} (1-x/x_{\text{ПК}})^{1,35},$$

$$x_{\text{ПК}} = -0,573q^{0,7} \left(\frac{P}{\rho w} \right)^{0,3},$$

після нескладних перетворень отримаємо

$$x = x_{\text{ПК}} \left(1 - \frac{\alpha^{0,74}}{\alpha_{\text{ПК}}} \right).$$

6. Прогнозування питомої густини теплового потоку $q_{\text{цщог}}$ при поверхневому кипінні ($T_{\text{ПК}} < T < T_s$) у разі зміни температури теплоносія на ΔT . На основі поточної інформації про значення q і T по робочій прямій на T - s діаграмі визначаємо $\Delta q = \Delta s (T + \Delta T)$ і розраховуємо прогнозне значення

$$q_{\text{прог}} = q + \Delta s(T + \Delta T).$$

Представлена вище методика побудови моделі передбачає монотонну зміну параметрів.

Відповідно до робочої прямої AD (фіг. 2,б) точка К, що визначає критичну температуру, зміщується в точку К' з координатами

$$s'_{\text{К}} = s_{\text{ПК}} + \Delta s_{\text{max}}/2 \quad (\Delta s_{\text{max}} = B) \text{ і } T'_{\text{К}}.$$

Для знаходження критичної точки С, що визначає $q_{\text{кр}}$ - критичну густину теплового потоку, виділимо два класи станів активної зони реактора у разі виникнення поверхневого кипіння: 1) криза теплообміну відсутня; 2) наявність кризи теплообміну. Як параметр стану системи приймемо ентропію. Розподіл усередині класів показника s описується нормальним законом з математичним очікуванням $s_{\text{ПК}}$ для першого і $s'_{\text{К}}$ для другого класу і однаковою дисперсією. Для знаходження критичної точки З, визначальною $q_{\text{кр}}$ критичну щільність теплового потоку, виділимо два класи станів активної зони реактора у разі виникнення поверхневого кипіння: 1) криза теплообміну відсутня; 2) наявність кризи теплообміну. Як параметр стану системи приймемо ентропію. Розподіл усередині класів показника s описується нормальним зако-

ном з математичним очікуванням s_{HK} для першого і s'_K для другого класу і однаковою дисперсією σ^2 . Точка s_{KP} перетину функцій густини розподілу відповідає ентропії системи в стані, для якого вірогідність кризи теплообміну і його відсутність рівні, тобто, визначає q_{KP} .

Координати точки С (фіг. 2, б) на робочій прямій

$$s_{KP} = (s_{PK} + s'_K)/2 = s_{PK} + B/4$$

і T_{KP} ($\Delta s = B/4$, $q = q_{PK}$, $\Delta T = T_{KP} - T_{PK}$) дають можливість розрахувати α_{KP} , x_{KP} , q_{KP} з приведених вище формул.

Запропонована графоаналітична модель дозволяє значно спростити розрахунок такого параметра, як масовий паровміст, замінивши ітераційний алгоритм його розрахунку послідовністю декількох формул. Побудова початкової робочої прямої проводиться з достатнім запасом часу до початку кипіння і виникнення необхідності проводити контроль параметрів процесу поверхневого кипіння. Модель дозволяє підвищити якість оцінки стану реактора за рахунок прогнозування параме-

трів процесу теплообміну і визначення значення параметрів кризи теплообміну в активній зоні до початку поверхневого кипіння, можливість якого не діагностується в сучасних системах внутрішнього реакторного контролю ВВЕР.

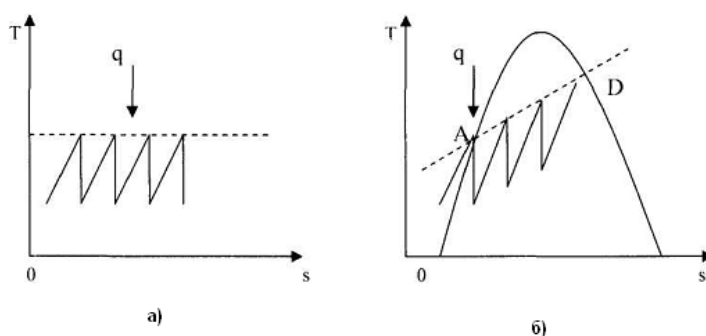
Джерела інформації:

1. Кириллов П.Л. Справочник по тепло гидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) //П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков - М: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

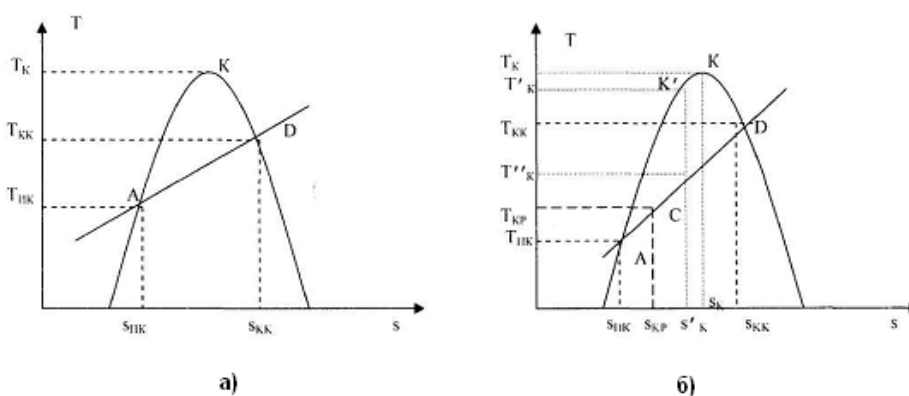
2. Попов И.А Идентификация кипения в экспериментальном канале ядерного реактора ИР-100 /И.А. Попов, А.А. Скидан, С.В. Петров //Промышленная теплотехника, - 2007. - т. 29, № 3. - С. 67-75.

3. Новиков И.И. Прикладная термодинамика и теплопередача / И.И. Новиков, К.Д. Воскресенский - М.: Атомиздат, 1977. - 352 с.

4. Крамер Э.У. Ядерные реакторы с кипящей водой /Э.У. Крамер - М.: Из-во иностр. литературы, 1960. - 509 с.



Фиг. 1



Фиг. 2