

**Бунь В.П.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Баган Т.Г.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИБІР ВИЗНАЧАЛЬНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПАРОПЕРЕГРІВАЧА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ КАТАСТРОФ

*У статті досліджені термодинамічні процеси, які проходять в пароперегрівачі прямооточного котлоагрегату.*

*Для вдосконалення якості функціонування автоматичної системи діагностики запропоновано розглядати термодинамічні процеси, які проходять в пароперегрівачі, з точки зору теорії катастроф.*

*Запропоновано підхід для вибору визначальних діагностичних параметрів, які необхідні для побудови адекватних аналітичних діагностичних моделей, що відображають зв'язок діагностичних ознак з ознаками дефектів.*

*Проведений аналіз термодинамічного циклу Ренкіна, який застосовується в сучасній теплоенергетиці, за допомогою методів теорії катастроф.*

*Аналіз кривої рівноваги «пароводяна суміш» – «перегріта пара» дозволив отримати ознаки катастрофи, на основі яких доведено, що крива рівноваги «пароводяна суміш» – «перегріта пара» відповідає фазовому переходу першого роду.*

*Для термодинамічного опису фазових переходів використана модель Гінзбурга-Ландау. Встановлено, що за умови дотримання принципу Максвелла біфуркаційна множина катастрофи збірки складається з прямої, що відповідає фазовим переходам першого роду, і граничної точки, яка відповідає фазовому переходу другого роду.*

*Аналіз досліджень засвідчив, що запропонований підхід для вибору діагностичних параметрів дає можливість побудови адекватних аналітичних діагностичних моделей, а як визначальні діагностичні параметри пароперегрівача доцільно вибирати температури саме за ширмовими і конвективними ступенями пароперегрівача і, відповідно, встановлювати контрольні точки в системі діагностування.*

**Ключові слова:** прямооточний котлоагрегат, система діагностування, діагностичні параметри, аналітичні моделі, пароперегрівач.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Пошкодження котлоагрегатів блоків 300 МВт становлять близько 80% всіх зупинок. За параметром потоку відмов для блоків 800 МВт є тенденція до підвищення надійності (тому що це найбільш економічне і надійне обладнання), а блоки 300 МВт такої тенденції не мають (тому що їх доводиться часто виводити в резерв) через складність контролю нестационарних потоків [1].

Відомі системи діагностики котлоагрегатів 300 МВт здійснюють в основному лише температурний контроль поверхонь нагріву і не виконують функції виявлення та діагностування порушень функціонування систем автоматичного керування (САК), не дозволяють оператору в будь-який момент вільно володіти впорядкованою інформа-

цією про стан САК, яка необхідна для виконання завдань керування ходом процесу [2; 3].

Моделі пароперегрівачів блоків 300 МВт, які призначені для вирішення завдань керування, непридатні для вирішення завдань синтезу алгоритмів виявлення і діагностики порушень, тому що для аналітичного дослідження діагностованості необхідна аналітична модель, що відображає зв'язок діагностичних ознак системи з ознаками дефектів.

Під час синтезу алгоритмів технічної діагностики однією з основних є завдання побудови адекватних діагностичних моделей, які однозначно пов'язують безліч можливих дефектів з безліччю доступних виміру технічних станів. Для оцінки таких властивостей діагностичних моделей

доцільно мати формалізовану процедуру оцінки або критерій діагностованості.

**Постановка задачі.** В сучасних енергетичних котлоагрегатах пароперегрівач є однією з основних теплосприймаючих поверхонь нагріву. Підвищення параметрів перегрітої пари сильно збільшує частку тепла, що отримується в пароперегрівачі, по відношенню до загального приросту ентальпії в котлоагрегаті. З підвищенням тиску величина приросту ентальпії падає. Це призводить до необхідних розділень пароперегрівача на велику кількість послідовно включених частин. Метал поверхні нагріву пароперегрівача має найвищу в котельному агрегаті температуру, що зумовлюється високою температурою пари і великими тепловими навантаженнями. Тому навіть порівняно невелике підвищення температури металу викликає значне зниження величини допустимих напружень. Пароперегрівач працює у важких експлуатаційних умовах і тому є одним з найбільш відповідальних елементів, що визначають надійність роботи котлоагрегату в цілому. Пароперегрівачі обладнані засобами для стабілізації температури перегрітої пари в тракці високого тиску і проміжного перегріву на заданому значенні. До точності підтримки температури перегріву висуваються дуже жорсткі вимоги. Характер динамічних процесів, що супроводжують керування перегрівом пари, сильно впливає на швидкість повзучості і термічну втому металу, а отже, на надійність роботи пароперегрівача. Тривале підвищення температури перегрітої пари і елементів конструкції пароперегрівача понад номінальне значення прискорює повзучість металу і тим самим скорочує термін його служби. Водночас тривале зниження температури перегріву призводить до зниження термодинамічного ККД котлоагрегату, а на проміжному перегріві, окрім того, ще й до підвищення вологості пари на останніх ступенях турбіни. Останній фактор зумовлює посилення ерозійного зносу лопаток і подальше зниження ККД проточної частини турбіни. Неприпустимі також і сильні коливання температури пари в пароперегрівних трактах котла. Адже у разі різкої зміни температури пари в масивних колекторах пароперегрівача виникають термічні напруження внаслідок того, що поблизу зовнішньої стінки температура металу не встигає швидко змінюватися. В таких випадках неоднакові температурні розширення зовнішньої і внутрішньої стінок масивної деталі ведуть до термічних напружень, втоми і окрупчування металу та появи тріщин цієї деталі. Паропере-

грівач як об'єкт діагностування можна представити у вигляді інерційної (динамічної) системи, на яку безперервно впливають експлуатаційні збурення у вигляді зміни навантаження, подачі палива і повітря, що призводять до відхилення температури пари на виході пароперегрівача. Для вибору визначальних діагностичних ознак пароперегрівача як об'єкта діагностування рекомендується провести аналіз фізичних процесів, що протікають в пароперегрівачі, з точки зору теорії катастроф.

#### Дослідження залежності зв'язку діагностичних параметрів з ознаками дефектів.

Для аналітичного дослідження діагностованості необхідно розробити аналітичну модель, яка відображає зв'язок діагностичних ознак системи з ознаками дефектів [4].

Кількісною характеристикою технічного стану об'єктів діагностування є визначальні діагностичні параметри  $\alpha_i$ ,  $i=1, q$ . Будь-який дефект об'єкта буде змінювати його технічний стан, що призведе до зміни визначальних діагностичних параметрів  $\alpha_i$ ,  $i=1, q$ . Дефект буде однозначно характеризуватися відхиленням поточного визначального діагностичного параметра  $\alpha_i$  від свого номінального значення  $\alpha_{in}$ . Тоді величина:

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_{in} \quad (1)$$

буде діагностичною ознакою  $i$ -го виду дефекта.

Технічний стан об'єкта можна описати за допомогою  $q$ -мірного вектора діагностичних параметрів

$$\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_q], \alpha \in \Omega, \quad (2)$$

де  $\Omega$  – множина допустимих значень діагностичних параметрів.

Для вибору і аналізу визначальних діагностичних параметрів рекомендується провести аналіз термодинамічних процесів, що протікають в пароперегрівачі за допомогою методів теорії катастроф [5].

Формулювання основних положень термодинаміки в термінах елементарної теорії катастроф дозволяє розглядати рівняння стану процесу як  $n$ -мірне різноманіття в  $2n$ -вимірному просторі  $\mathbf{R}^n \otimes \mathbf{R}^n$   $n$  інтенсивних і  $n$  екстенсивних термодинамічних змінних. Це різноманіття збігається з критичним різноманіттям потенційних функцій  $V(\mathbf{x}; \mathbf{c})$ , що залежать від  $n$  змінних стану  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  і  $k$  керуючих параметрів  $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^k$ . Тоді аналіз фізичного процесу зводиться до дослідження рівноваги і локальної стійкості потенційної функції  $V(\mathbf{x}; \mathbf{c})$ :

$$\frac{\partial V}{\partial x_i} = 0 \quad \text{– рівновага}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j} = 0 \quad \text{– локальна стійкість}$$
(3)

і критичних значень на гілках стійкої рівноваги. Перше з рівнянь (3) складається з  $n$  рівнянь стану. Воно може бути використано для виявлення їх залежності від керуючих параметрів  $c$ :

$$x^{(p)} = x^{(p)}(c), \quad p = 1, 2, \dots$$

Локальна стійкість  $p$ -ї критичної точки визначається видом матриці стійкості в точці  $(x^{(p)}(c); c)$ . Фазовий перехід відбувається в той момент, коли точка  $x \in \mathbf{R}^n$ , що описує критичний стан процесу, перескакує з однієї гілки на іншу. Фазовий перехід має місце, коли крива  $c_a(S) \in \mathbf{R}^k$  перескакує відповідну компоненту сепаратриси в  $\mathbf{R}^k$ . Якщо дотримуватися принципу Максвелла, то фазові переходи будуть мати місце при перетині кривої рівноваги компоненти максвеллівської множини  $\Phi_m$ , на яких не менше 2-х глобальних мінімумів вироджені.

Основним термодинамічним циклом, що застосовується в сучасній теплоенергетиці, є цикл Ренкіна (рис. 1) [6].

Цикл Ренкіна в  $T, S$  – діаграмі зображений на Рис. 2. Робочим тілом теплосилової установки є пара. Волога пара в конденсаторі повністю конденсується по ізобарі  $P_2 = \text{const}$  (т.3). Потім вода стискається насосом від тиску  $P_2$  до тиску  $P_1$ , цей адіабатний процес зображений в  $T, S$  – діаграмі вертикальним відрізком 3-5. Довжина відрізка 3-5 в  $T, S$  – діаграмі дуже мала, тому що в області рідини ізобари в  $T, S$  – діаграмі проходять дуже

близько одна від одної. З насоса вода під тиском  $P_1$  надходить в котлоагрегат, де до неї в ізобарному процесі ( $P_1 = \text{const}$ ) підводиться теплота. Спочатку вода в котлоагрегаті нагрівається до кипіння (ділянка 5-4) ізобари ( $P_1 = \text{const}$ ), а потім, після досягнення температури кипіння, відбувається процес пароутворення (ділянка 4-6 ізобари  $P_1 = \text{const}$ ). Потім в пароперегрівачі пара нагрівається до температури, що перевищує температуру при даному тиску  $P_1$  (ділянка 6-1). Після цього перегріта пара направляє в проточну частину турбіни, спочатку в канали соплової решітки, де відбувається процес адіабатного розширення. Точка 2 знаходиться в області вологої насиченої пари. Відпрацьована в турбіні пара надходить в конденсатор, в якому охолодженою водою від пари відбирається тепло (пар конденсується: процес 2-3) і перетворюється на воду (конденсат) з параметрами стану в точці 3.

Таким чином, 5-4-6-1 – це ізобарний процес передачі теплоти до води (5-4), пароводяної суміші (4-6) і перегрітої пари (6-1) в котлоагрегаті. Особливий інтерес на фазовій діаграмі представляє ділянка 6-1 (процес, що відбувається в пароперегрівачі), де різниця між рідкою і газоподібною фазами зникає.

Розглянемо т. 6, яка є граничною точкою на кривій фазових переходів першого роду. Навколо цієї точки має місце катастрофа збірки. Термодинамічні змінні  $P, T$  пов'язані з математичними параметрами управління:  $a = a(P, T)$ ,  $b = b(P, T)$  [7].

Якщо криву рівноваги фаз «пароводяна суміш» – «перегрита пара» ототожнити з максвеллівською множиною  $\Phi_m$  катастрофи збірки ( $a < 0, b = 0$ ), то отримаємо такі ознаки катастрофи:

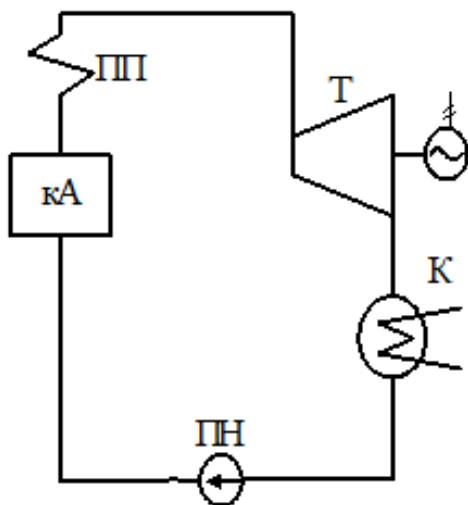


Рис. 1. Схема паросилової установки з перегрівом пари

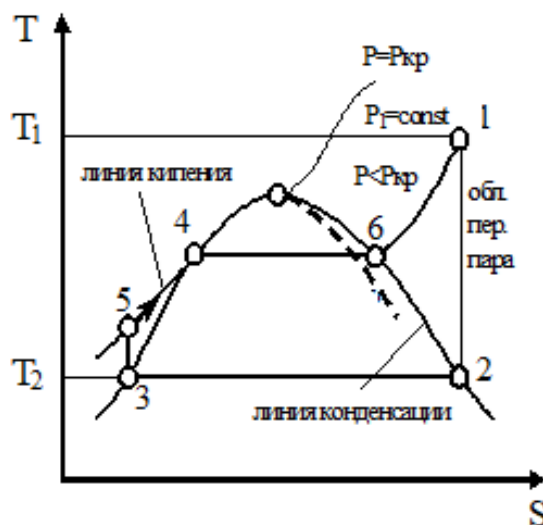


Рис. 2. Діаграма циклу Ренкіна з перегрівом пари

1. **Модальність.** Фізична система може мати два або більше різних фізичних станів, при цьому рідка і газоподібна фаза чітко визначені. Тобто потенціальна функція, яка описує систему, має більш ніж один локальний мінімум в деякій області зміни зовнішніх керуючих параметрів.

2. **Недосяжність.** Ця ознака катастрофи не має явного фізичного аналога.

3. **Катастрофічні стрибки.** Невеликі зміни температури і тиску призводять до великих стрибкоподібних змін об'єму.

4. **Розбіжність.** Перегріту пару з пароводяної суміші можна отримати або стрибкоподібно, якщо перетинати криву рівноваги, або безперервно – шляхом обходу навколо точки збірки С (рис. 3).

Близькі шляхи з близьких початкових станів можуть привести до якісно різних кінцевих станів.

5. **Гістерезис.** Гістерезис має місце, коли фізичний процес не є повністю зворотнім.

З Рис. 4 видно, що якщо С – точка збірки, то крива рівноваги фаз буде оточена спінодалями, за якими система вже не буде бімодальною.

6. **Розбіжність лінійного відгуку.** При невеликій зміні керуючих параметрів положення точки рівноваги буде трохи змінюватись. Однією з функцій відгуку однокомпонентних речовин є ізотермічна стисливість:  $k_t = -V^{-1}(\frac{\partial V}{\partial P})_T$ . Ця функція відгуку необмежено зростає по мірі наближення до кривої рівноваги фаз.

7. **Аномальні зміни.** Під час конденсації пари утворюються маленькі крапельки рідини, які осідають. Оскільки рідина густіше пари, при зворотньому переході (кипінні) невеликі пухирці газу, що утворюються всередині рідини, піднімаються вгору. При підході до критичної точки знизу різниця в густині двох фаз зникає,

і розміри крапельок і бульбашок зростають до величини, за якої відбувається дуже сильне розсіювання світла в даному середовищі. Через очікування аномально великих значень радіусів бульбашок і крапельок це явище назвали каламутністю. Таким чином, можна стверджувати, що точка кривої рівноваги «пароводяна суміш» – «перегріта пара» відповідає фазовому переходу першого роду.

Як правило, для термодинамічного опису фазових переходів використовують модель Гінзбурга-Ландау. Суть цієї моделі полягає в наступному. Для опису стану фізичної системи вводиться параметр порядку  $x$ . Повна енергія системи представляється у вигляді суми членів, що описують кінетичну  $\sim(\frac{dx}{dt})^2$  і потенційну  $V(x)$  енергію. Остання залежить як від зовнішніх керуючих параметрів, так і від змінної стану  $x$ . Стан спокою системи досягається в результаті мінімізації суми цих двох членів. У статичному випадку ( $\frac{dx}{dt}=0$ ) стан системи визначається величиною  $x$ , що мінімізує  $V(x)$ .

Потенціал Гінзбурга-Ландау:

$$V(x,a,b) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}x^2a + bx \quad (4)$$

має єдиний мінімум в точці  $x=0$  при  $a \geq 0$  і два рівних мінімуму в  $x = \pm \sqrt{-a}$  при  $a \leq 0$  (рис. 5).

Фазовий перехід другого роду відбувається при переході  $a$  через нуль. У цьому разі керуючий параметр  $a$  навколо критичної температури  $T_{кр}$  ідентифікується з  $T - T_{кр}$ , а біфуркаційна фазова діаграма представляє собою стандартний тризуб (рис. 6).

При температурах нижче критичної  $T_{кр}$  спостерігаються два стійких стану, а вище – лише один.

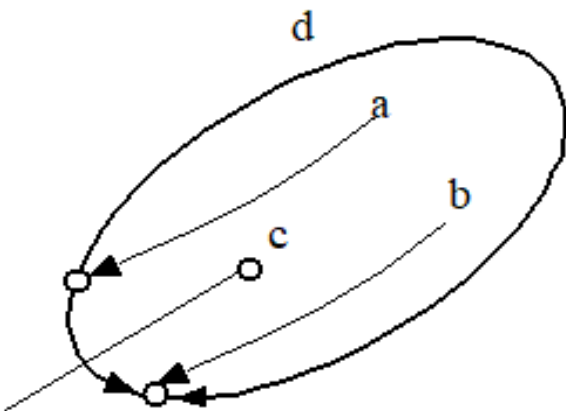


Рис. 3. Вплив збурень на криву рівноваги фаз

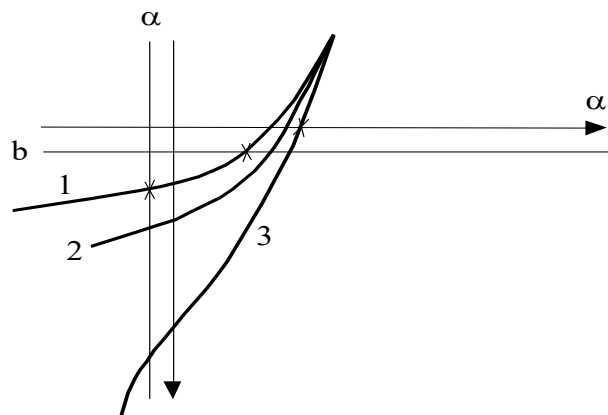


Рис. 4. Криві збурень фазових переходів

- 1 – спінодаль при низькій температурі та високому тиску
- 2 – лінія фазових переходів першого роду
- 3 – спінодаль при високій температурі та низькому тиску

$$V(x,a) = \frac{1}{4}x^4 - \frac{1}{2}ax^2$$

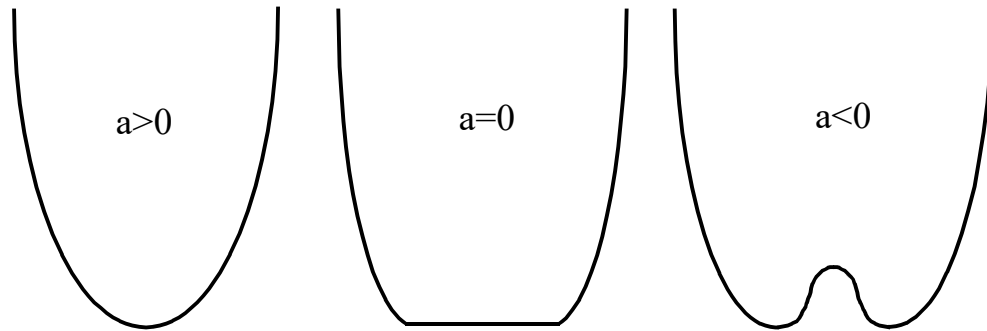


Рис. 5. Криві потенціалу Гінзбурга-Ландау

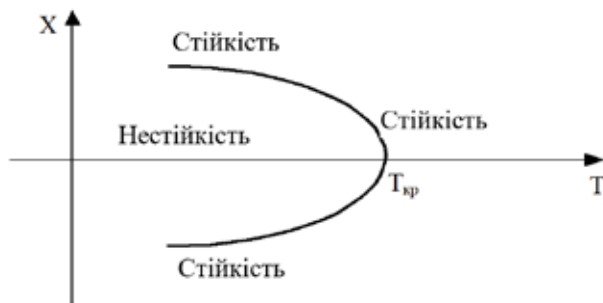


Рис. 6. Біфуркаційна фазова діаграма

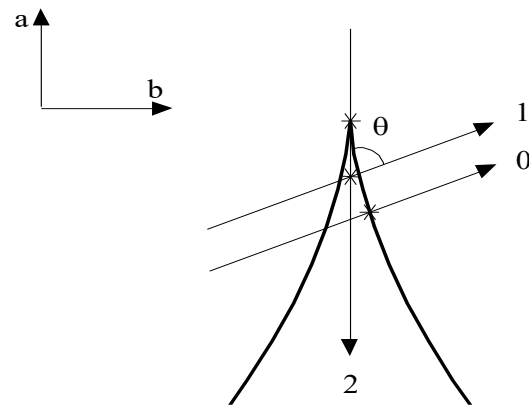


Рис. 7. Крива фазового переходу

Порядок фазового переходу залежить тільки від прийнятого принципу і шляху проходження. Оскільки криву рівноваги фаз «пароводяна суміш» – «перегріта пара» ми ототожили з максвеллівською множиною  $\phi_m$  ( $a < 0, b = 0$ ), то з Рис. 7 видно, що фазовий перехід відбувається в т.\*, де змінна стану системи перескакує з правого мінімуму в  $x^{(r)} = \sqrt{-a}$  на лівий мінімум в  $x^{(l)} = -\sqrt{-a}$ . Потенційна функція в цих точках має рівні чисельні значення  $V^{(r)} = V^{(l)} = -\frac{a^2}{4}$ , однак перша похідна вздовж кривої 1 терпить розрив на максвеллівській множині.

Величину стрибка можна визначити, якщо обчислити значення:

$$\frac{d}{ds} V(\mathbf{x}; \mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{ds} + \frac{\partial V}{\partial a} \frac{da}{ds} + \frac{\partial V}{\partial b} \frac{db}{ds} \quad (5)$$

на максвеллівській множині. Похідні  $\frac{da}{ds}$ ,  $\frac{db}{ds}$  можна інтерпретувати, як напрямляючі косинуси, а

$$\frac{db}{da} = \left(\frac{db}{ds}\right) / \left(\frac{da}{ds}\right) = \text{tg}\theta \quad (6)$$

Оскільки  $\frac{dV}{dx} = 0$ , то

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dS} \Big|_{\phi_m} &= \left(\frac{1}{2}x^2 \cos\theta - x \sin\theta\right)^{(l)} - \\ &- \left(\frac{1}{2}x^2 \cos\theta + x \sin\theta\right)^{(r)} = -2\sqrt{-a} \sin\theta \end{aligned} \quad (7)$$

Ця функція описує фазовий перехід першого роду, оскільки її перша похідна зазнає розрив неперервності, який залежить не тільки від положення точки фазового переходу, але і від напрямку кривої рівноваги при її перетині максвеллівської множини.

Розглянемо криву 2. Уздовж цієї кривої  $S=0$  і

$$V(S)=0, S \geq 0; V(S) = -\frac{S^2}{4}, S \leq 0. \quad (8)$$

При  $S=0$  як сам потенціал, так і його перша похідна неперервні, проте друга похідна терпить розрив, оскільки:

$$\Delta \frac{d^2V}{dS^2} = \frac{d^2V(1)}{dS^2} - \frac{d^2V(0)}{dS^2} = -\frac{1}{2}. \quad (9)$$

Цей фазовий перехід уздовж кривої 2 є переходом другого роду.

**Висновки.** Точка кривої рівноваги фаз «пароводяна суміш» – «перегріта пара» відповідає фазовому переходу першого роду.

За дотримання принципу Максвелла біфуркаційна множина катастрофи збірки складається з напівпрямой ( $\mathbf{a}<\mathbf{0}$ ,  $\mathbf{b}=\mathbf{0}$ ), що відповідає фазовим переходам першого роду і граничної точки ( $\mathbf{a}=\mathbf{0}$ ,  $\mathbf{b}=\mathbf{0}$ ), яка відповідає фазовому переходу другого роду.

Під час розробки діагностичних аналітичних моделей пароперегрівачів як визначальні діагностичні параметри доцільно вибирати температури саме за ширмовим і конвективним пароперегрівачем і відповідно встановлювати контрольні точки в системі діагностування.

#### Список літератури:

1. Гвоздь М.Я., Горін У.З. Проблеми сучасного стану та перспектив модернізації вітчизняних теплоелектроцентралей. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики». Київ, 2020. С. 27.
2. Дубовский С.В. Современные проблемы и перспективы развития тепловой энергетики. *Проблеми загальної енергетики*. Київ, 2008. С. 7.
3. Макаров А.С. Актуальные проблемы теплоэнергетики Украины и их решение. Энергетика и ресурсосбережение. Київ, 2019, № 4.
4. Доценко Б.И. Диагностирование динамических систем. Киев : Техника. 1983. 186 с.
5. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Москва : Мир, 1984. 635 с.
6. Техническая термодинамика / Под ред. К.И. Крутова. Москва : Высшая школа, 1971. 325 с.
7. Бунь В.П., Онишко Я.С. Применение методов теории катастроф для анализа физических процессов в теплоэнергетке. Международный научно-теоретический журнал «*News of Science and Education*». 2018. № 2. С. 46–51.

#### **Bun V.P., Bahan T.H. SELECTION OF DEFINITIVE DIAGNOSTIC PARAMETERS OF A STEAM HEATER OF A DIRECT-FLOW BOILER USING THE METHODS THEORY OF CATASTROPHE**

*The article studies the thermodynamic processes that take place in the superheater of a direct-flow boiler. To improve the quality of operation of the automatic diagnostic system, it is proposed to consider the thermodynamic processes that take place in the superheater in terms of catastrophe theory. An approach for the selection of determining diagnostic parameters, which are necessary for the construction of adequate analytical diagnostic models that reflect the relationship of diagnostic features with signs of defects, is proposed. An analysis of the thermodynamic cycle of Rankin, which is used in modern thermal power in terms of catastrophe theory. Analysis of the equilibrium curve steam-water mixture – superheated steam allowed to obtain signs of catastrophe. Based on the obtained signs of the catastrophe, it is proved that the equilibrium curve of steam-water mixture – superheated steam corresponds to the phase transition of the first kind. The Ginzburg-Landau model was used for the thermodynamic description of phase transitions. It is established that, following the Maxwell principle, the bifurcation set of the assembly catastrophe consists of a line corresponding to the phase transitions of the first kind and a boundary point corresponding to the phase transition of the second kind.*

*The analysis of researches showed that the offered approach for a choice of diagnostic parameters gives the chance to construct adequate analytical diagnostic models, and as defining diagnostic parameters of a superheater it is expedient to choose temperatures on screen and convective degrees of a superheater and accordingly to establish control points in diagnostic system.*

**Key words:** direct-flow boiler unit, diagnostic system, diagnostic parameters, analytical models, superheater.