

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК681.125

СПРОЩЕНИЙ АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ ПЕРЕГРІТОЇ ПАРИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

E-mail: oksana.slabyk@gmail.com, fmatiko@gmail.com

Показник адіабати є одним із параметрів, необхідних для реалізації рівняння вимірювання витрати газоподібних середовищ за методом змінного перепаду тиску. Однак у відомих джерелах відсутні рівняння для розрахунку показника адіабати водяної пари. Авторами розроблено рівняння розрахунку показника адіабати на основі базових термодинамічних залежностей і рівнянь методу Міжнародної організації властивостей води та водяної пари IAPWS-IF97. Це рівняння доповнює набір залежностей, необхідних для обчислення параметрів перегрітої водяної пари під час вимірювання її витрати за методом змінного перепаду тиску. Сформовано масив точних значень показника адіабати для діапазону температур перегрітої водяної пари від 0°C до 800°C та тиску до 100 МПа. За результатами опрацювання цього масиву розроблено спрощені аналітичні залежності для розрахунку показника адіабати перегрітої пари для тиску пари від лінії насичення до 100 МПа та температур від 97°C до 800°C. Для досягнення необхідної точності спрощених залежностей досліджений діапазон зміни температури розділено на три піддіапазони: від 97 °C до 350 °C, від 350 °C до 570 °C та від 570°C до 800°C. Виконано перевірку розробленого спрощеного рівняння шляхом порівняння результатів обчислення показника адіабати за спрощеним рівнянням із зразковими значеннями, отриманими за рівняннями IAPWS-IF97. Встановлено, що методична похибка розрахунку значень показника адіабати за спрощеним рівнянням у вказаних діапазонах тиску та температури пари не перевищує 2,62 %. Оскільки показник адіабати не входить безпосередньо до рівняння витрати пари за методом змінного перепаду тиску, то вплив похибки його обчислення на невизначеність вимірюваного значення витрати є опосередкованим. Тому застосування спрощеного рівняння не призведе до суттєвого збільшення невизначеності вимірюваного значення витрати. Розроблено спрощений алгоритм розрахунку показника адіабати на основі спрощених залежностей та обмежень щодо їх застосування.

Ключові слова: показник адіабати; перегріта пара; алгоритм розрахунку; методична похибка; метод змінного перепаду тиску.

Постановка проблеми

Основними параметрами, які необхідно визначати під час обліку кількості теплової енергії, що переноситься перегрітою парою за певний проміжок часу, є ентальпія та витрата пари. Умови застосування витратомірів під час вимірювання витрати пари є складними, зокрема це високі тиск та температура, тому тут широко застосовують витратоміри змінного перепаду тиску [1]. Для реалізації рівняння витрати за методом змінного перепаду тиску необхідно визначати її густину, динамічну в'язкість та показник адіабати.

В системах обліку теплової енергії густину води (пари), а також її теплофізичні параметри обчислюють в реальному часі на основі вимірних значень тиску і температури теплоносія. Відповідно розрахунок витрати і кількості виконують на основі обчислених значень параметрів потоку. Отже, для реалізації алгоритмів обчислення витрати у таких системах необхідно застосувати точні

методи розрахунку параметрів теплоносія.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Системи опалення, в яких у якості теплоносія застосовують пару, в більшості випадків влаштовують у промислових котельнях для обігріву виробничих та адміністративних приміщень через те, що характерною особливістю паропроводів є шум і висока температура опалювальних приладів. Згідно з [2], облік теплової енергії, яка постачається з перегрітою парою, здійснюють приладовим способом. Кількість відпущеної теплової енергії визначають за різницею показів теплових лічильників, які встановлені на паропроводі і конденсатопроводі. Облік теплової енергії, яка постачається з перегрітою парою, у разі відсутності засобів вимірювання витрати пари, що враховують наявність у ній рідкої фази, здійснюють розрахунковим способом.

Сьогодні актуальними є два Міжнародних

стандарту, які описують термодинамічні властивості води та водяної пари - IAPWS-95 [3] та IAPWS-IF97 [4]. Проте застосування аналітичних залежностей IAPWS-95, розроблених на основі фундаментального рівняння вільної енергії Гельмгольца, передбачає обчислення поліномів, що містять до 56 членів. Це в свою чергу призводить до необхідності опрацювання великих масивів коефіцієнтів, а відповідно до збільшення часу розрахунку.

У документі IAPWS-IF97 [4] представлено аналітичні залежності для обчислення параметрів води (водяної пари) дещо простіші від залежностей стандарту [3], однак у [4] відсутні рівняння для обчислення показника адиабати водяної пари.

Для промислового застосування розроблена методика IAPWS R7-97(2007) [5], проте даний документ містить зміни, які доповнюють лише базове рівняння для області перегрітої пари високої температури, значення якої знаходяться в межах від 800°C до 2000 °C та які не стосуються рівнянь для визначення термодинамічних параметрів областей води, насиченої та перегрітої пари до 800°C.

Отже у відомих джерелах відсутні залежності для обчислення показника адиабати водяної пари, тому актуальним є розроблення аналітичних залежностей та алгоритму обчислення показника адиабати для їх застосування під час вимірювання витрати водяної пари за методом змінного перепаду тиску.

Розроблення спрощеного алгоритму визначення показника адиабати перегрітої пари

Область параметрів перегрітої пари обмежена кривою насичення (див. рис. 1), тому обчислюючи її теплофізичні параметри слід контролювати граничні значення тиску та температури пари на лінії насичення. У документі IAPWS-IF97 [4], діапазон температури поділено на декілька піддіапазонів для досягнення вищої точності рівнянь розрахунку параметрів пари у кожному з піддіапазонів. Ці піддіапазони є такими: від 0 °C до 350 °C, від 350 °C до 590 °C, від 590 °C до 800 °C. Оскільки у цій роботі розглядаємо промислові системи вимірювання витрати водяної пари, то нижню границю температури обмежимо значенням 97°C.

Тиск пари на лінії насичення для вказаних піддіапазонів температури визначаємо таким чином:

- для діапазону температур від 97 °C до 350 °C граничному значенню тиску перегрітої пари, (p) відповідає тиск сухої насиченої пари $p_c(T)$, який обчислюють з розв'язку рівняння, яке описує лінію насичення сухої пари [6];
- для діапазону температур від 350 °C до 590 °C граничне значення тиску перегрітої пари визначають за формулою

$$p_{wc} = n_1 + n_2 T + n_3 T^2, \quad (1)$$

де T – температура перегрітої пари, K ;

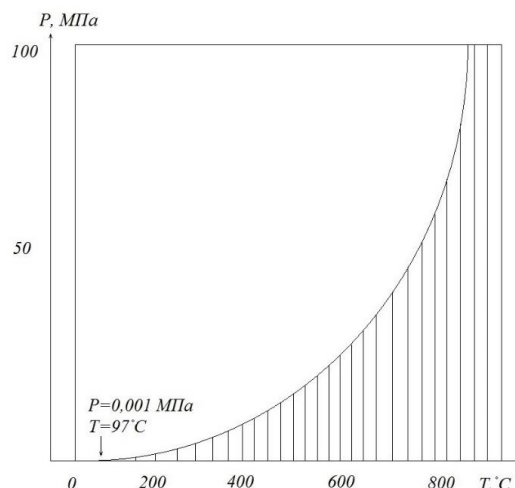


Рис. 1. Лінія насичення та область перегрітої водяної пари

n_1, n_2, n_3 – постійні коефіцієнти, на межі між областю перегрітої пари та двостановою областю перегрітої води та охолодженої пари [4].

- для діапазону температур від 590 °C до 800 °C за граничне значення тиску перегрітої пари приймаємо 100 МПа.

Якщо рівняння стану виражено залежністю питомого об'єму від тиску та температури перегрітої пари $v = v(p, T)$, то показник адиабати перегрітої пари доцільно визначати за рівнянням [7]:

$$\chi = - \frac{v}{p} \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T^{-1}, \quad (2)$$

де v – питомий об'єм перегрітої пари, c_p – питома ізобарна теплоємність перегрітої пари, c_v – питома ізохорна теплоємність перегрітої пари, p – тиск перегрітої пари, T – температура перегрітої пари.

Для визначення термодинамічних параметрів перегрітої водяної пари v , c_p , c_v для діапазону температур до 800 °C (область перегрітої пари, рис. 1.) застосуємо рівняння IAPWS97[4].

Питомий об'єм водяної пари може бути обчислений за рівнянням з методики IAPWS-IF97[4]:

$$v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi (\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r), \quad (3)$$

де $\pi = p / p^*$; $p^* = 1$ МПа;

γ_π^0 , γ_π^r – часткові похідні питомого об'єму по тиску [4].

Питому ізобарну та ізохорну теплоємність водяної пари обчислюють за рівняннями IAPWS97 [4]:

$$c_p = -\tau^2 R (\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r), \quad (4)$$

$$c_v = R \left[-\tau^2 (\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r) - \frac{(1 + \pi \gamma_\pi^r - \tau \pi \gamma_{\pi\pi}^r)^2}{1 - \pi^2 \gamma_{\pi\pi}^r} \right], \quad (5)$$

де τ – приведена температура, $\tau = T^*/T$, $T^* = 540$ К.

Для формули (2) потрібно отримати відношення питомих теплоємностей $\frac{c_p}{c_v}$. Застосувавши

вирази (4) і (5), отримуємо

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{\tau^2 (\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r) (\gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r)}{((\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r) - \tau (\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r))^2 - \tau^2 (\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r) (\gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r)} \quad (6)$$

Застосовуючи формулу (3), запишемо вираз відношення питомого об'єму до тиску пари

$$\frac{v}{p} = \frac{(\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r) RT}{p p^*} \quad (7)$$

На основі залежностей із IAPWS97 [4] отримуємо вираз часткової похідної $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T^{-1} &= \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T \frac{p^*}{p} = \left(\frac{\partial v}{\partial p^*}\right)_T = \\ &= \left[\frac{\partial \left(\frac{(\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r) RT}{p^*} \right)}{\partial p^*} \right]^{-1} = \left[\frac{RT}{(p^*)^2} \frac{\partial \gamma_{\pi}}{\partial p} \right]^{-1}, \quad (8) \end{aligned}$$

де $\delta p = p^* \delta \pi$.

Підставивши отримані вирази (6) – (8) у формулу (2), отримуємо

$$\chi = \frac{\tau^2 (\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r) (\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r)}{\pi \left[((\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r) - \tau (\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r))^2 - \tau^2 (\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r) (\gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r) \right]} \quad (9)$$

Ввівши позначення $\gamma_1 = \gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r$, $\gamma_2 = \gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r$, $\gamma_3 = \gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r$, $\gamma_4 = \gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r$, запишемо формулу (9) у вигляді

$$\chi = \frac{\tau^2 \gamma_1 \gamma_2}{\pi \left[(\gamma_1 - \tau \gamma_3)^2 - \tau^2 \gamma_4 \gamma_2 \right]} \quad (10)$$

Розроблене нами рівняння (10) дає можливість обчислити значення показника адиабати перегрітої водяної пари в діапазоні температури від 0 °С до 800 °С та тиску до 100 МПа. Рівняння (10) доповнює набір залежностей роботи IAPWS-IF97 [4], необхідних для обчислення параметрів перегрітої водяної пари під час вимірювання її витрати за методом змінного перепаду тиску. Однак, для застосування формули (10) необхідно обчислити значення часткових похідних питомого об'єму, що ввійшли до рівняння (10). Формули цих часткових похідних є поліномами, які містять до 56 членів, що в свою чергу призводить до опрацювання великих масивів коефіцієнтів, а, відповідно, до ускладнення алгоритму та збільшення часу розрахунку. Тому доцільно розробити спрощене рівняння для обчислення показника адиабати, що дасть можливість спростити алгоритм його розрахунку.

Застосовуючи формулу (10), сформовано масив точних значень показника адиабати для діапазону температури перегрітої водяної пари від 0 °С до 800 °С та тиску до 100 МПа. Похибка обчислення показника адиабати за формулою (10) не перевищує 0,5 %, за винятком області високого тиску (більше 10 МПа), де похибка може бути дещо більшою.

На основі сформованого масиву точних значень показника адиабати нами розроблені спрощені залежності для обчислення цього показника в алгоритмах обчислювачів витрати перегрітої водяної пари. Масив значень показника адиабати представлений у вигляді графіків залежностей показника адиабати перегрітої пари від зміни тиску та температури для трьох діапазонів зміни температури (див. рис. 2 - 4).

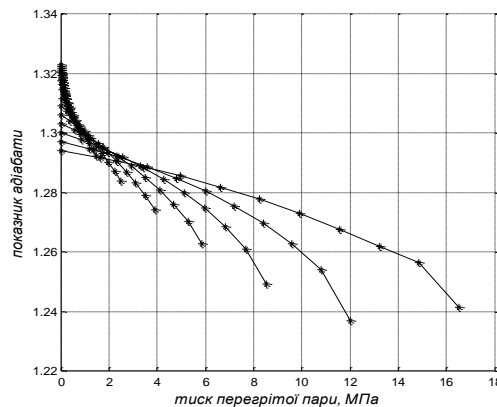
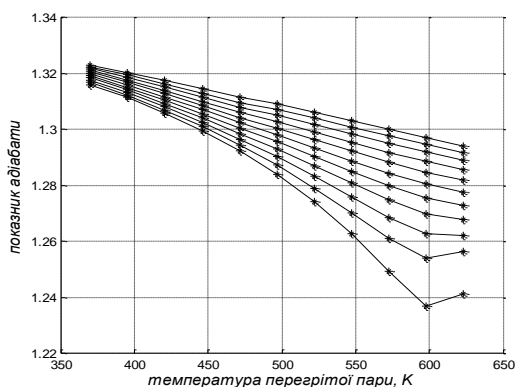


Рис. 2. Графіки залежностей показника адиабати від зміни температури пари в діапазоні від 97 °С до 350 °С та зміни тиску від 0 до $p_c(T)$, МПа

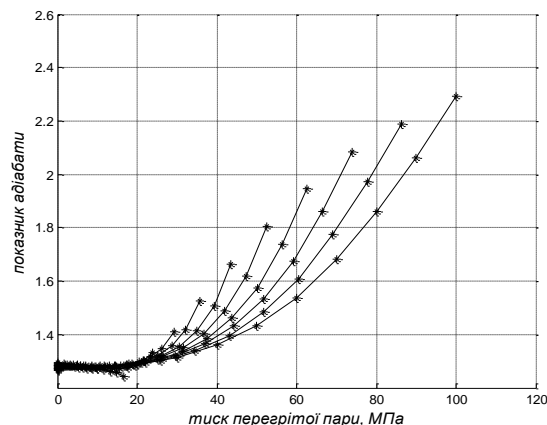
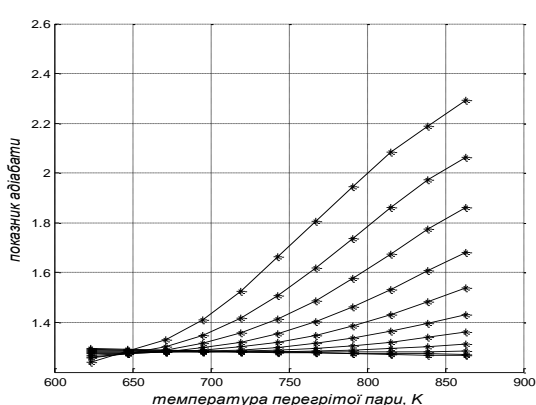


Рис. 3. Графіки залежностей показника адиабати від зміни температури пари в діапазоні від 350 °С до 590 °С та зміни тиску від 0 до $p_{ws}(T)$, МПа

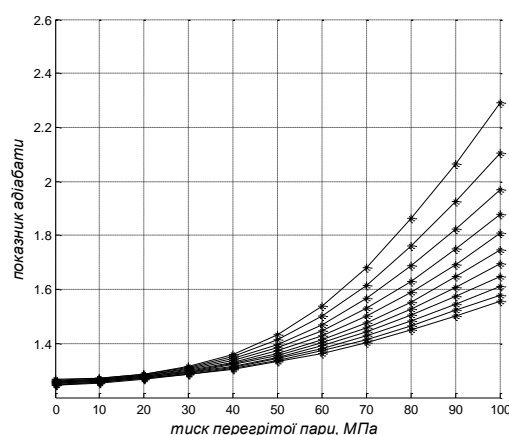
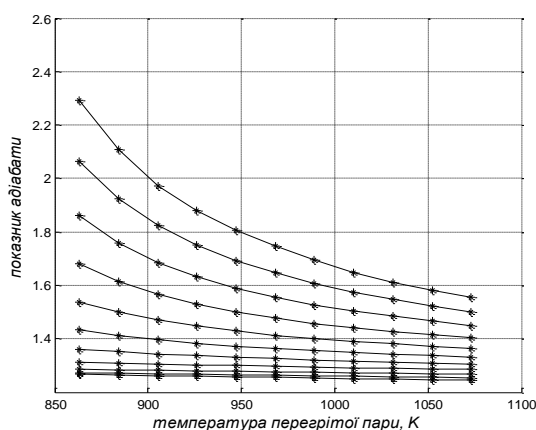


Рис. 4. Графіки залежностей показника адиабати від зміни температури пари в діапазоні від 590 °С до 800 °С та зміни тиску від 0 до 100, МПа

В результаті аналізу залежностей значень χ від тиску та температури встановлено, що вплив температури та тиску на показник адиабати $\chi=f(p,T)$ перегрітої пари можна описати квадратичною функцією:

$$\chi = a_0 p^2 + a_1 p + a_2, \quad (11)$$

де p – тиск перегрітої пари, МПа.

Коефіцієнти рівняння (11) a_0 , a_1 , a_2 для вказаних діапазонів тиску та температури перегрітої пари визначено за методом найменших квадратів шляхом апроксимації масиву даних, сформованого за рівнянням (10).

Залежності коефіцієнтів рівняння (11) від температури доцільно апроксимувати поліномами різного порядку.

Зокрема для піддіапазону температури пари від 97 °С до 350 °С отримано такі поліноми:

$$a_0 = 2,2039 \cdot 10^{-3} t^5 - 5,7263 \cdot 10^{-2} t^4 + 5,9141 \cdot 10^{-1} t^3 - 3,0336 t^2 + 7,725 t - 7,8102, \quad t = T/100; \quad (12)$$

$$a_1 = -9,5634 \cdot 10^{-3} t^4 + 2,0267 \cdot 10^{-1} t^3 - 1,6089 t^2 +$$

$$+ 5,6809 t - 7,5455; \quad (13)$$

$$a_2 = -4,399 \cdot 10^{-4} t^2 - 7,8874 \cdot 10^{-3} t + 1,3591. \quad (14)$$

Результати наближення значень коефіцієнтів поліномами (12) – (14) представлено на рис. 5.

Для інших двох піддіапазонів температури залежності коефіцієнтів рівняння (11) від температури апроксимовано такими поліномами:

- для температури від 350 °С до 590 °С

$$a_0 = 1,1773 \cdot 10^{-4} t^3 - 2,8718 \cdot 10^{-3} t^2 + 2,3125 \cdot 10^{-2} t - 6,1223 \cdot 10^{-2}; \quad (15)$$

$$a_1 = -1,5532 \cdot 10^{-3} t^4 + 4,7092 \cdot 10^{-2} t^3 - 5,2875 \cdot 10^{-1} t^2 + 2,6039 t - 4,7479; \quad (16)$$

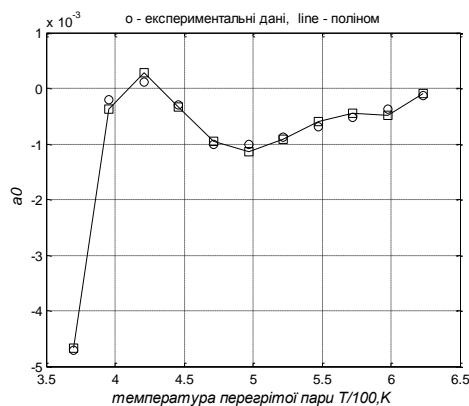
$$a_2 = 2,2798 \cdot 10^{-3} t^4 - 7,9756 \cdot 10^{-2} t^3 + 1,0078 t^2 - 5,4924 t + 12,248; \quad (17)$$

- для температури від 590 °С до 800 °С

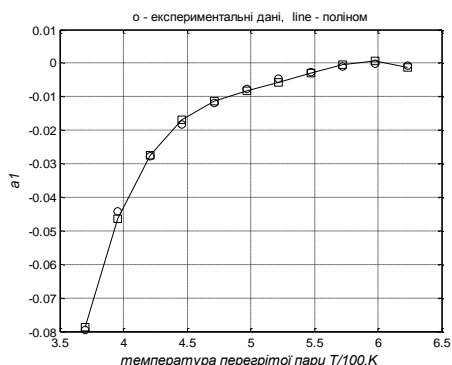
$$a_0 = -1,4095 \cdot 10^{-5} t^3 + 4,3459 \cdot 10^{-4} t^2 - 4,4885 \cdot 10^{-3} t + 1,5565 \cdot 10^{-2}; \quad (18)$$

$$a_1 = 5,6991 \cdot 10^{-4} t^3 - 1,7517 \cdot 10^{-2} t^2 + 1,8030 \cdot 10^{-1} t - 6,2141 \cdot 10^{-1}; \quad (19)$$

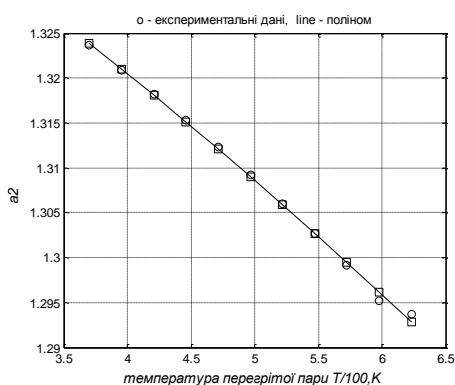
$$a_2 = 5,0151 \cdot 10^{-3} t^2 - 1,1572 \cdot 10^{-1} t + 1,9127. \quad (20)$$



а)



б)



в)

Рис. 5. Результати апроксимації залежностей коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 рівняння (11) від температури ($T = 97 \div 350^\circ\text{C}$)

Методичну похибку розрахунку показника адиабати (δ_m) за спрощеними залежностями визначено за рівнянням [8]:

$$\delta_m = [\delta_{\text{сист}}^2 + (2\delta_{\text{см}})^2 + \delta_{\text{експ}}^2]^{0,5}, \quad (21)$$

де $\delta_{\text{сист}}$ – систематичне відхилення від експериментальних даних

$$\delta_{\text{сист}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i,$$

δ_i – максимальне відхилення в i -й точці експериментальних даних

$$\delta_i = 100 [(\chi_p - \chi_{\text{експ}}) / \chi_{\text{експ}}];$$

$\delta_{\text{см}}$ – стандартне відхилення

$$\delta_{\text{см}} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\delta_i - \delta_{\text{сист}})^2 \right]^{0,5};$$

$\delta_{\text{експ}}$ – похибка експериментальних даних (0,1 %).

Результати порівняння значень показника адиабати, отриманих за спрощеним рівнянням (11), із значеннями, що отримані за рівнянням (10), представлені у вигляді графіків залежностей відносного відхилення δ_i від тиску для фіксованих значень температури (див. рис. 6).

Криві залежностей δ_i для кожної окремої температури на рис. 6 позначені такими символами:

- для діапазону зміни температури від 97 до 350 °C (рис. 6, а):

- o – 370,15 K; Δ – 395,45 K; × – 420,75 K;
- + – 446,05 K; ◁ – 471,35 K; * – 496,65 K;
- – 521,95 K; ▷ – 547,25 K; ◇ – 572,55 K;
- ▽ – 597,85 K; ★ – 623,15 K.

- для діапазону зміни температури від 350 до 590 °C (рис. 6, б):

- o – 623,15 K; Δ – 647,15 K; × – 671,15 K;
- + – 695,15 K; ◁ – 719,15 K; * – 743,15 K;
- – 767,15 K; ▷ – 791,15 K; ◇ – 815,15 K;
- ▽ – 839,15 K; ★ – 863,15 K.

- для діапазону зміни температури від 590 до 800 °C (рис. 6, в):

- o – 863,15 K; Δ – 884,15 K; × – 905,19 K;
- + – 926,19 K; ◁ – 947,18 K; * – 968,18 K;
- – 989,17 K; ▷ – 1010,17 K; ◇ – 1031,16 K;
- ▽ – 1052,6 K; ★ – 1073,15 K.

Із графіків, представлених на рис. 6, видно, що відносне відхилення δ_i знаходиться в межах:

- для діапазону зміни температури від 97 до 350 °C від -0,3 % до +1,5 %;
- для діапазону зміни температури від 350 до 590 °C від -3,0 % до +3,0 %;
- для діапазону зміни температури від 590 до 800 °C від -1,5 % до +1,5 %.

Відповідно, методична похибка розрахунку показника адиабати за рівнянням (11), обчислена за формулою (21) становить:

- для діапазону зміни температури від 97 до 350 °C – 0,72 %;

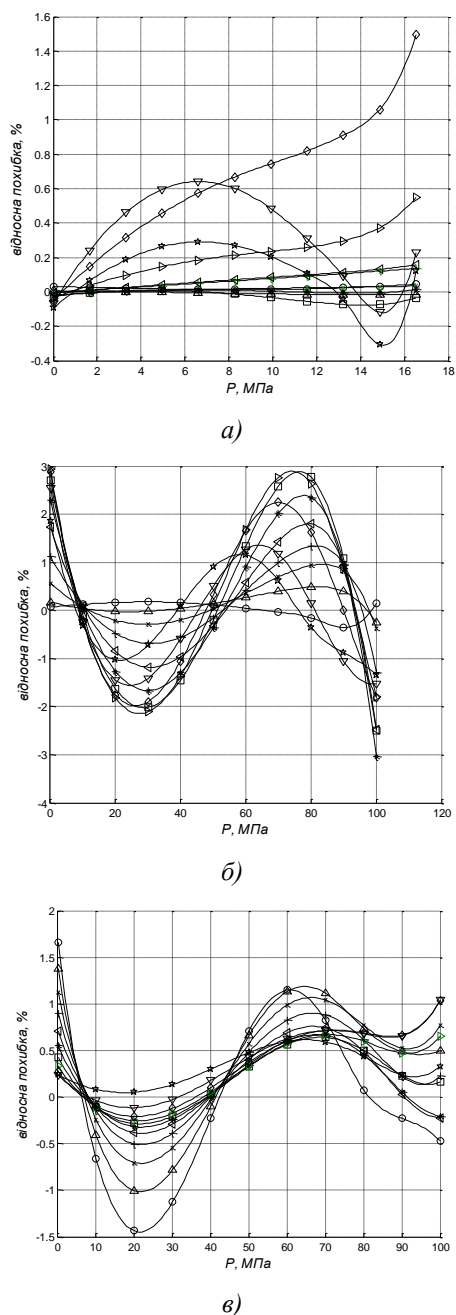


Рис. 6. Графіки відхилень значень показника адиабати, обчислених за (10) від значень отриманих за розробленим алгоритмом:
 а) $T=97\div 350^{\circ}\text{C}$, $p=0\div p_c$, МПа;
 б) $T=350\div 590^{\circ}\text{C}$, $p=0\div p_{ws}$, МПа;
 в) $T=590\div 800^{\circ}\text{C}$, $p=0\div 100$, МПа

- для діапазону зміни температури від 350 до 590°C – 2,62 % ;
- для діапазону зміни температури від 590 до 800°C – 1,19 % .

Оскільки показник адиабати не входить безпосередньо до рівняння витрати пари за методом змінного перепаду тиску, то вплив похибки його обчислення на невизначеність вимірюваного значення витрати є опосередкованим.

Тому застосування спрощеного рівняння (11) не призведе до суттєвого збільшення невизначеності вимірюваного значення витрати [10], а отже, рівняння (11) може бути застосоване в алгоритмах обчислювачів витрати перегрітої водяної пари.

Спрощений алгоритм обчислення показника адиабати є таким:

- 1) задають вихідні значення температури та тиску перегрітої водяної пари;
- 2) визначають належність значення температури до одного з діапазонів застосування спрощеного алгоритму;
- 3) залежно від обраного діапазону температури обчислюють значення коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 , застосовуючи рівняння (12) – (14) або (15) – (17), або (18) – (20);
- 4) маючи значення коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 , за рівнянням (11) обчислюють значення показника адиабати.

Висновки

За результатами цієї роботи розроблено спрощений алгоритм розрахунку показника адиабати перегрітої водяної пари. Встановлено, що запропонований алгоритм дає можливість обчислити показник адиабати з методичною похибкою, що не перевищує 2,62 % для діапазону зміни температури пари від 97°C до 800°C та тиску – від тиску насичення до 100 МПа. Така точність розрахунку є достатньою для застосування спрощеного алгоритму у обчислювачах витрати перегрітої водяної пари.

Література

- [1] Л. В. Лессовой, “Розрахунок витрати вологої водяної пари за методом змінного перепаду тиску із стандартним звужувальним пристроєм”, *Методи та прилади контролю якості*, Вип. 26, с. 71-76, 2011.
- [2] ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013.
- [3] International Association for the Properties of Water and Steam (1995), Release on the IAPWS Industrial Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. [Online]. Available: <http://www.iapws.org>
- [4] International Association for the Properties of Water and Steam (1997), Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. [Online]. Available: <http://www.iapws.org>
- [5] W. Wagner, J. R. Cooper, A. Dittmann, The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, Vol. 122, JANUARY 2000.
- [6] F. Matiko, O. Slabyk, L. Lesovoy, H. Matiko, “Technique for Evaluating the Uncertainty of

Enthalpy of Water and Steam for Thermal Energy Metering Systems”, *JEECS*, Vol. 4, no 2, pp. 79 – 86, 2018.
doi: 10.23939/jeeecs2018.02.079.

- [7] Э. Э. Шпильрайн, П. М. Кессельман, *Основы теории теплофизических свойств веществ*. Москва, СССР: Энергия, 1977.
- [8] ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. [Введ. 01.07.1997]. Минск, 1997.

[9] Л. В. Лесовой, “Розрахунок показника адиабати при визначенні кількості теплоти, що переноситься перегрітою парою”, *Методи та прилади контролю якості*, № 8, с. 51-54, 2002.

- [10] Ф. Д. Матіко, “Вплив невизначеностей фізичних властивостей газоподібних енергоносіїв на точність їх обліку”, *Вимірвальна техніка та метрологія: Міжвідомчий наук.–техн. збірник*, Вип.70, с. 76-82, 2009.

УДК 681.125

О. М. Слабик, Ф. Д. Матико, Л. В. Лесовой

Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

УПРОЩЕННИЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Показатель адиабаты является одним из параметров, необходимых для реализации уравнения измерения расхода газообразных сред методом переменного перепада давления. В работе представлены разработанные упрощенные аналитические зависимости и алгоритм расчета показателя адиабаты перегретого пара для диапазона температуры от 97 °С до 800 °С и давления до 100 МПа. Разработана методика расчета примерных значений показателя адиабаты по базовым термодинамическим зависимостям и уравнениям IAPWS-IF97. Выполнена проверка разработанного упрощенного уравнения путем сравнения результатов вычисления показателя адиабаты по упрощенному уравнению с примерными значениями, полученными по уравнениям IAPWS-IF97. Установлено, что методическая погрешность расчета значений показателя адиабаты по упрощенному уравнению не превышает 2,62 %.

Ключевые слова: показатель адиабаты; перегретый пар; алгоритм расчета; методическая погрешность; метод переменного перепада давления.

O. M. Slabyk, F. D. Matiko, L. V. Lesovoy

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

SIMPLIFIED ALGORITHM FOR CALCULATING ISENTROPIC EXPONENT OF SUPERHEATED STEAM FOR THERMAL ENERGY METERING AUTOMATED SYSTEMS

Isentropic exponent is an important parameter for implementing the equation for measuring the flowrate of gaseous fluids by means of pressure differential method. However there are no equations for calculating the isentropic exponent of water steam in the known sources. The equations for calculating the isentropic exponent of superheated steam based on the thermodynamic dependences and equations of International Association for the Properties of Water and Steam IAPWS-IF97 are developed. This equation complements the dependencies for calculating the parameters of superheated steam for measuring the flowrate using pressure differential method. An array of exact values of isentropic exponent for a range of temperature of superheated steam from 0 °C to 800 °C and pressure up to 100 MPa is formed. Using the array processing results the simplified analytical dependencies for calculating the isentropic exponent of superheated steam for a pressure range from the saturation line to 100 MPa and a temperature range from 97 °C to 800 °C are developed. The investigated temperature range was divided into three sub-ranges: from 97 °C to 350 °C, from 350 °C to 590 °C and from 590 °C to 800 °C in order to achieve the required accuracy of simplified dependencies. The developed simplified equation was verified by comparing the isentropic exponent values obtained by this equation with reference values obtained by the equations IAPWS-IF97. The methodical error of calculating the isentropic exponent obtained by the simplified equation does not exceed 2.62% in the specified pressure and temperature ranges. Since the steam flowrate equation for the pressure differential method does not contain the isentropic exponent the effect of the isentropic exponent error on the uncertainty of the measured flowrate is indirect. Therefore, the application of the simplified equation does not significantly increase the uncertainty of the flowrate measurement. A simplified algorithm is developed for calculating the isentropic exponent based on the simplified dependencies and proposed limits of their application.

Keywords: isentropic exponent; superheated steam; calculating algorithm; methodic error; pressure differential method.

*Надійшла до редакції
08 квітня 2019 року*

*Рецензовано
17 квітня 2019 року*