

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ ТА ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.121:533.21

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ, ЩО ПЕРЕНОСИТЬСЯ ПЕРЕГРІТОЮ ПАРОЮ

© Лесовой Л. В., 2002

Національний університет "Львівська політехніка"

Наведений алгоритм розрахунку кількості теплоти, що переноситься перегрітою парою. Пропонується методика розрахунку показника адіабаты перегрітої пари, яка необхідна для визначення кількості теплоти. Виконано аналіз похибок визначення показника адіабаты перегрітої пари.

Сьогодні особливу увагу слід приділяти економії паливно-енергетичних ресурсів та економному їх використанню. До паливно-енергетичних ресурсів відносяться природний газ, пара, гаряча вода та інші. Для їх економного використання важливим є визначення кількості енергії, що переноситься ними, зокрема кількість теплоти, що переноситься теплоносіями, особливо перегрітою парою.

Кількість теплоти Q , яка переноситься перегрітою парою за певний проміжок часу, розраховується за рівнянням

$$Q = \int_{\tau_n}^{\tau_k} h(\tau) \cdot Q_M(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $h(\tau)$ - ентальпія перегрітої пари, яка знаходиться згідно з [1]; $Q_M(\tau)$ - масова витрата перегрітої пари; τ_k та τ_n - кінцеве та початкове значення часу τ , на протяязі якого визначають кількість теплоти Q .

Оскільки перегріта пара, як правило, знаходиться при високому тиску та температурі, то найкращим методом для вимірювання витрати перегрітої пари є метод змінного перепаду тиску, який широко застосовується для вимірювання витрати та кількості паливно-енергетичних ресурсів та теплоносіїв. Масова витрата перегрітої пари Q_M визначається за методом змінного перепаду тиску зі стандартними пристроями звуження потоку (діафрагма, сопло, труба Вентурі) як первинних перетворювачів витрати згідно з рівнянням [2, 3]

$$Q_M = \frac{\pi}{4} \cdot d_{20}^2 \cdot K_t^2 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho}, \quad (2)$$

де d_{20} - діаметр стандартного пристрою звуження потоку при температурі 20 °С, K_t - поправний множник на теплове розширення матеріалу стандартного пристрою звуження потоку, α - коефіцієнт

витрати стандартного пристрою звуження потоку, ε - поправний множник на розширення перегрітої пари, ΔP - перепад тиску на стандартному пристрої звуження потоку, ρ - густина перегрітої пари.

В залежності від марки сталі стандартного пристрою звуження потоку та значення температури t перегрітої пари значення K_t знаходять за формулою [3]

$$K_t = 1 + \gamma_d(t - 20), \quad (3)$$

де γ_d - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стандартного пристрою звуження потоку.

Для діафрагм з кутовим способом відбору перепаду тиску коефіцієнт витрати α обчислюють за формулою [2, 3]

$$\alpha = 0,5959 + 1,0312 \cdot m^{1,05} - 0,184 \cdot m^4 + 0,0029 \cdot m^{1,25} \cdot \left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0,75} \cdot k_n k_u / \sqrt{1 - m^2}, \quad (4)$$

де m - відносна площа діафрагми, Re - число Рейнольдса, k_n - поправний множник на затуплення вхідного канту при вхідному отворі діафрагми, k_u - поправний множник на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу.

Значення поправного множника на розширення перегрітої пари для тієї ж діафрагми розраховують за допомогою такого рівняння [2, 3]:

$$\varepsilon = 1 - (0,4 + 0,35 \cdot m^2) \cdot \frac{\Delta P}{P \cdot \chi}, \quad (5)$$

де P - абсолютний тиск перегрітої пари, χ - показник адіабаты перегрітої пари.

Значення відносної площі m стандартного пристрою звуження потоку, поправних множників на затуплення вхідного канту при вхідному отворі діа-

фрагми k_n та на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу $k_{ш}$, числа Рейнольдса Re розраховуються за рівняннями, наведеними в [3]. Для розрахунку ж показника адіабати перегрітої пари існують рівняння у вигляді диференціальних залежностей [4], з яких можна знайти значення χ .

Якщо рівняння стану, яким описуються термодинамічні властивості перегрітої пари, представлене у вигляді $v = v(P, T)$, то показник адіабати знаходиться згідно з рівнянням

$$\chi = -\frac{v}{P} \cdot \frac{c_p}{c_v} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T^{-1}, \quad (6)$$

де c_p - питома ізобарна теплоємність перегрітої пари, c_v - питома ізохорна теплоємність перегрітої пари, v - питомий об'єм перегрітої пари, T - абсолютна температура перегрітої пари. Якщо ж рівняння стану представлене у вигляді $P = P(\rho, T)$, то

$$\chi = \frac{\rho}{P} \cdot \frac{c_p}{c_v} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T. \quad (7)$$

Авторами [1] наведене наступне диференціальне рівняння для визначення показника адіабати перегрітої пари:

$$\chi = v \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial v \partial \theta} \right)^2 / \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} \right)_v - \frac{\partial^2 \psi}{\partial v^2}}{\left(\frac{\partial \psi}{\partial v} \right)_\theta} \right\}, \quad (8)$$

де v - приведений об'єм, який розраховується за

рівнянням $v = v/v_{kp}$; θ - приведена температура, яка визначається за рівнянням $\theta = T/T_{kp}$; ψ - характеристична функція Гемгольца [1].

На базі експериментальних даних, наведених у табл. 1 (P_0 [кгс/см], t [°C]), нами отримане аналітичне таке рівняння для визначення показника адіабати χ перегрітої пари в діапазоні температур від 0 °C до 650 °C та абсолютного тиску від 611 Па до лінії насичення, тиск на якій не перевищує 10 МПа:

$$\chi = \sum_{i=0}^3 \left(\frac{1}{a_i \cdot T_0 + b_i} + c_i \right) \cdot P_0^i, \quad (9)$$

де a_i , b_i та c_i - коефіцієнти рівняння, значення яких наведені в табл. 2; T_0 та P_0 - параметри, які розраховуються за рівняннями

$$T_0 = 0,01 \cdot t, \quad (10)$$

$$P_0 = P/98066,5. \quad (11)$$

Область визначення показника адіабати перегрітої пари за рівнянням (9) показана на рис. 1 (заштрихована область).

Тиск пари на лінії насичення розраховується за таким уточненим нами рівнянням:

$$P_{ин} = 10^6 \cdot \exp(82,865856 - 7821,541/T + 0,01028003 \cdot T - 11,48776 \cdot \ln(T)) + 4, \quad (12)$$

$$T = t + 273,15. \quad (13)$$

P , МПа

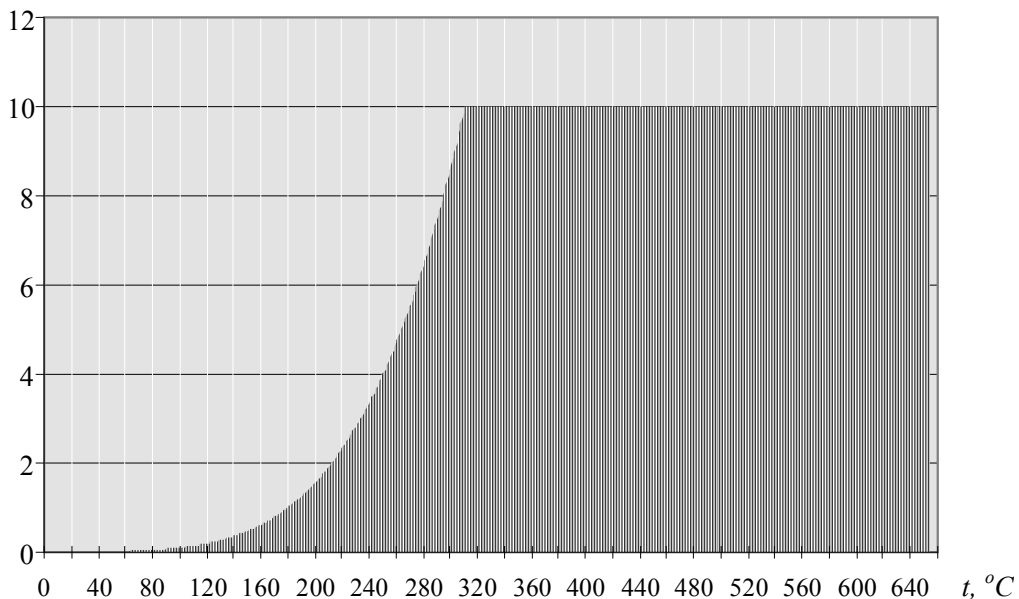


Рис. 1. Область розрахунку показника адіабати χ перегрітої пари за рівнянням (9)

Таблиця 1 - Експериментальні значення показника адіабати $\chi_{експ}$ перегрітої пари.

$P_0 \backslash t$	1	200	250	300	400	500	600	650
$6,23 \cdot 10^{-3}$	1,3298	1,3121	1,3060	1,2990	1,2871	1,2770	1,2662	1,2600
2		1,3115	1,3055	1,2986	1,2869	1,2769	1,2661	1,2600
4		1,3107	1,3050	1,2982	1,2867	1,2767	1,2660	1,2599
6		1,3098	1,3045	1,2979	1,2866	1,2765	1,2658	1,2599
8		1,3089	1,3039	1,2975	1,2864	1,2763	1,2657	1,2599
10		1,3080	1,3034	1,2970	1,2862	1,2761	1,2656	1,2598
12			1,3028	1,2968	1,2859	1,2759	1,2655	1,2597
14			1,3021	1,2962	1,2857	1,2757	1,2654	1,2596
16			1,3015	1,2960	1,2856	1,2756	1,2653	1,2594
18			1,3008	1,2954	1,2854	1,2754	1,2651	1,2593
20			1,3000	1,2950	1,2851	1,2752	1,2650	1,2592
22			1,2993	1,2945	1,2849	1,2750	1,2649	1,2592
24			1,2985	1,2940	1,2847	1,2749	1,2648	1,2592
26			1,2978	1,2935	1,2845	1,2748	1,2647	1,2592
28			1,2970	1,2929	1,2843	1,2747	1,2646	1,2592
30			1,2963	1,2926	1,2839	1,2746	1,2646	1,2591
32			1,2955	1,2920	1,2838	1,2745	1,2645	1,2591
34			1,2946	1,2915	1,2835	1,2743	1,2644	1,2591
36			1,2938	1,2909	1,2831	1,2741	1,2643	1,2591
38			1,2930	1,2903	1,2829	1,2739	1,2642	1,2591
40			1,2920	1,2898	1,2826	1,2738	1,2641	1,2591
42				1,2890	1,2823	1,2736	1,2640	1,2591
44				1,2885	1,2821	1,2734	1,2639	1,2591
46				1,2878	1,2818	1,2732	1,2638	1,2591
48				1,2871	1,2815	1,2730	1,2637	1,2591
50				1,2865	1,2812	1,2729	1,2637	1,2591
52				1,2859	1,2810	1,2727	1,2636	1,2591
54				1,2852	1,2808	1,2725	1,2635	1,2591
56				1,2844	1,2805	1,2723	1,2634	1,2591
58				1,2835	1,2801	1,2722	1,2633	1,2591
60				1,2827	1,2799	1,2721	1,2632	1,2591
62				1,2821	1,2796	1,2720	1,2632	1,2591
64				1,2814	1,2793	1,2718	1,2632	1,2591
66				1,2805	1,2790	1,2716	1,2631	1,2591
68				1,2799	1,2788	1,2714	1,2631	1,2591
70				1,2790	1,2785	1,2713	1,2631	1,2591
72				1,2781	1,2781	1,2711	1,2631	1,2591
74				1,2774	1,2778	1,2710	1,2630	1,2591
76				1,2766	1,2775	1,2709	1,2630	1,2591
78				1,2758	1,2772	1,2709	1,2630	1,2591
80				1,2750	1,2768	1,2708	1,2630	1,2591
82					1,2764	1,2707	1,2630	1,2591
84					1,2760	1,2705	1,2630	1,2591
86					1,2755	1,2703	1,2630	1,2591
88					1,2750	1,2701	1,2630	1,2591
90					1,2746	1,2699	1,2630	1,2591
92					1,2741	1,2698	1,2629	1,2591
94					1,2736	1,2697	1,2629	1,2591
96					1,2731	1,2696	1,2629	1,2591
98					1,2725	1,2694	1,2629	1,2591
100					1,2719	1,2692	1,2629	1,2591

Таблиця 2 - Значення постійних коефіцієнтів a_i , b_i та c_i рівняння (9).

Коефіцієнти a_i , b_i та c_i	Значення коефіцієнтів a_i , b_i та c_i для $0^\circ\text{C} \leq t \leq 350^\circ\text{C}$	Значення коефіцієнтів a_i , b_i та c_i для $350^\circ\text{C} < t \leq 650^\circ\text{C}$
a_0	1,79622	0,0614944
b_0	-16,16384	-2,726858
c_0	1,391649	1,690311
a_1	$-1,035753 \cdot 10^4$	$-2,198962 \cdot 10^0$
b_1	$3,757385 \cdot 10^4$	$-2,78169 \cdot 10^2$
c_1	$-3,092162 \cdot 10^{-4}$	$3,36985 \cdot 10^{-3}$
a_2	$-3,41959 \cdot 10^5$	$5,17725 \cdot 10^6$
b_2	$6,52539 \cdot 10^5$	$-1,462612 \cdot 10^7$
c_2	$7,68114 \cdot 10^{-7}$	$1,23895 \cdot 10^{-7}$
a_3	$3,856053 \cdot 10^7$	$-5,01245 \cdot 10^7$
b_3	$-7,646496 \cdot 10^7$	$1,24447 \cdot 10^8$
c_3	$-2,41596 \cdot 10^{-8}$	$6,70167 \cdot 10^{-9}$

Відносна похибка $\delta_{\chi a}$ апроксимації експериментальних даних показника адіабати $\chi_{експ}$ у зазначеній області дії рівняння (9) знаходилась за виразом

$$\delta_{\chi a} = 100 \cdot \frac{\chi - \chi_{експ}}{\chi_{експ}} \quad (14)$$

Відносна похибка δ_{χ} визначення показника адіабати χ , розрахованого згідно з рівнянням (9), визначається за формулою

$$\delta_{\chi} = \left[k_p^2 \cdot \delta_p^2 + k_t^2 \cdot \delta_t^2 + \delta_{\chi m}^2 \right]^{0,5}, \quad (15)$$

в якій k_p - коефіцієнт впливу відносної похибки δ_p визначення абсолютного тиску на похибку розрахунку показника адіабати; k_t - коефіцієнт впливу відносної похибки δ_t визначення температури на похибку розрахунку показника адіабати; $\delta_{\chi m}$ - мето-

дична похибка визначення показника адіабати, яка знаходиться як максимальне значення відносної похибки $\delta_{\chi a}$ і, як показали наші дослідження, вона не перевищує значення $\delta_{\chi m} = 0,05\%$.

Коефіцієнт впливу k_p та k_t кожної похибки на похибку δ_{χ} визначення показника адіабати перегрітої пари знаходять за значенням першої похідної від функції визначення показника адіабати (9) відповідно по тиску P та температурі t знаходять згідно з рівняннями

$$k_p = \frac{P}{\chi} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial P}, \quad (16)$$

$$k_t = \frac{t}{\chi} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial t}. \quad (17)$$

Порівнюючи результати розрахунку показника адіабати за рівнянням (9) з експериментальними даними, наведеними в табл. 1, можна стверджувати, що запропонована нами методика забезпечує точність розрахунку, яка є достатньою для задач обліку кількості теплоти, що переноситься перегрітою парою.

Виконаний аналіз показав, що запропонована методика розрахунку показника адіабати χ перегрітої пари може бути застосована в системах обліку кількості теплоти, що переноситься перегрітою парою, за допомогою методу змінного перепаду тиску з мікропроцесорними обчислювачами.

1. Ривкин С. Л., Александров А. А. *Теплофизические свойства воды и водяного пара*. - М.: Энергия, 1980.
2. ISO 5167. *Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full. 1st edition, 1980*.
3. *Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. РД50-213-80 / Изд-во стандартов, 1982*.
4. Шпильрайн Э. Э., Кессельман П. М. *Основы теории теплофизических свойств веществ*. - М.: Энергия, 1977.