

УДК 681.121.84

## РОЗРАХУНОК ВИТРАТИ ВОЛОГОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА МЕТОДОМ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ІЗ СТАНДАРТНИМ ЗВУЖУВАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ

Л. В. Лесовой

Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013,  
тел. (8-032) 272-77-61, e-mail: [acit@polynet.lviv.ua](mailto:acit@polynet.lviv.ua)

Отримано нові рівняння для розрахунку значень абсолютного тиску сухої насиченої пари, термодинамічної температури сухої насиченої пари та розроблений алгоритм розрахунку масової витрати вологої водяної пари за методом змінного перепаду тиску для обчислювачів витрати та кількості і вимірювальних комплексів.

Ключові слова: метод, витрата, діафрагма, волога водяна пара, властивості, алгоритм, витратомір, густина, в'язкість, коефіцієнт розширення.

Получены новые уравнения для расчета значений абсолютного давления сухого насыщенного пара, термодинамической температуры сухого насыщенного пара и разработан алгоритм расчета массового расхода влажного водяного пара за методом переменного перепада давления для вычислителей расхода и количества и измерительных комплексов.

Ключевые слова: Метод, расход, диафрагма, влажный водяной пар, свойства, алгоритм, расходомер, плотность, вязкость, коэффициент расширения

Are Received a new saturation-pressure equation and saturation-temperature equation and is designed algorithm of the calculation of the mass flowrate humid water steam for method of the differential pressure for computing of the mass flowrate and the quantity or measuring systems in this paper.

Key words: method, flowrate, orifice-plate, humid water steam, properties, algorithm, flowmeter, density, dynamic viscosity, expansibility factor.

При вимірюванні витрати та кількості паливно-енергетичних ресурсів, до яких відноситься і волога водяна пара, найбільш широке розповсюдження набув метод змінного перепаду тиску, який застосовує первинний перетворювач діафрагму. Алгоритми розрахунку значень витрати та кількості вологої водяної пари на відміну від інших середовищ не наведені у національних стандартах України ДСТУ ГОСТ 8.586.2,5:2009 [1, 2] із-за відсутності залежностей для розрахунку фізичних параметрів вологої водяної пари і коефіцієнта, який входить у рівняння витрати середовища. Це створює проблеми у виготовленні обчислювачів витрати та кількості, а також вимірювальних комплексів для вимірювання витрати та кількості вологої водяної пари. Виходячи з вищесказаного, виникає необхідність, застосовуючи вимоги стандартів [1, 2], розробити рівняння для розрахунку фізичних властивостей вологої водяної пари і коефіцієнта, який входить у рівняння витрати вологої водяної пари.

Волога водяна пара – це стан середовища на лінії насичення, який характеризується

наявністю одночасно кип'ячої води і сухої насиченої пари.

Лінія насичення характеризується однозначною залежністю між абсолютним тиском  $p_{cnn}$  сухої насиченої пари і термодинамічною температурою  $T_{cnn}$  сухої насиченої пари і за останніми експериментальними даними описується таким рівнянням [3]:

$$\beta_s^2 \vartheta^2 + n_1 \beta_s^2 \vartheta + n_2 \beta_s^2 + n_3 \beta_s \vartheta^2 + n_4 \beta_s \vartheta + n_5 \beta_s + n_6 \vartheta^2 + n_7 \vartheta + n_8 = 0, \quad (1)$$

де  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8$  - постійні коефіцієнти, значення яких наведені у табл. 1;

$$\beta_s = \left( \frac{p_{cnn}}{p^*} \right)^{1/4},$$

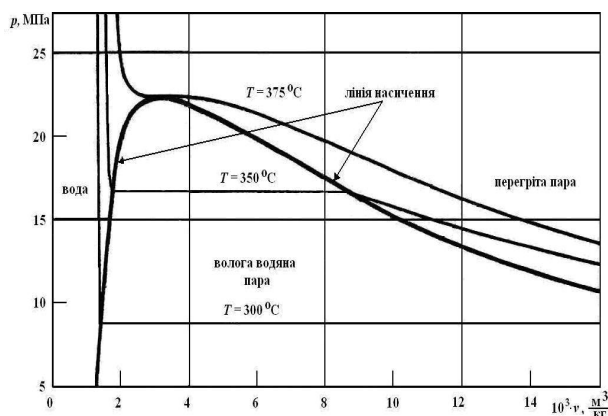
$$\vartheta = \frac{T_{cnn}}{T^*} + \frac{n_9}{\frac{T_{cnn}}{T^*} - n_{10}};$$

$p^*$  - псевдокритичний тиск, значення якого приймається рівним 1 МПа;  $T^*$  – псевдокритична температура, значення якої приймається рівним 1 К.

**Таблиця 1 - Значення постійних коефіцієнтів  $n_i$  для області сухої насиченої пари**

$i$	$n_i$	$i$	$n_i$
1	$0,11670521452767 \cdot 10^4$	6	$0,14915108613530 \cdot 10^2$
2	$-0,72421316703206 \cdot 10^6$	7	$-0,48232657361591 \cdot 10^4$
3	$-0,17073846940092 \cdot 10^2$	8	$0,40511340542057 \cdot 10^6$
4	$0,12020824702470 \cdot 10^9$	9	$-0,23855557567849$
5	$-0,32325550322333 \cdot 10^7$	10	$0,65017534844798 \cdot 10^3$

Стан води, перегрітої пари та вологої водяної пари показані на  $p-v$  діаграмі, приведений на рис. 1 [4].



**Рисунок 1 – Стан води, перегрітої пари та вологої водяної пари**

Відповідно до [5] вологість вологої водяної пари визначається сухістю  $x$  вологої водяної пари, яка характеризує відношення різниці між значеннями приведенного питомого об'єму  $\chi$  вологої водяної пари і приведенного питомого об'єму  $\chi_v$  води до різниці між значеннями приведенного питомого об'єму  $\chi_{снп}$  сухої насиченої пари і приведенного питомого об'єму  $\chi_v$  води. Значення ступені сухості  $x$  вологої водяної пари розраховують за таким рівнянням [5]:

$$x = \frac{\chi - \chi_v}{\chi_{снп} - \chi_v} \quad (2)$$

Приведений питомий об'єм  $\chi$  вологої водяної пари, приведений питомий об'єм  $\chi_v$

води і приведений питомий об'єм  $\chi_{снп}$  сухої насиченої пари визначають відповідно за рівняннями [5]:

$$\chi = \frac{v_{ввп} [p_{снп}(T_{снп}), T_{снп}]}{v_c} \quad (3)$$

$$\chi_v = \frac{v_v [p_{снп}(T_{снп}), T_{снп}]}{v_c} \quad (4)$$

$$\chi_{снп} = \frac{v_{снп} [p_{снп}(T_{снп}), T_{снп}]}{v_c} \quad (5)$$

де  $v_{ввп}$  – питомий об'єм вологої водяної пари за абсолютним  $p_{снп}$  тиском сухої насиченої пари і термодинамічною температурою  $T_{снп}$  вологої водяної пари;  $v_v$  – питомий об'єм води за абсолютним тиском  $p_{снп}$  сухої насиченої пари і термодинамічною температурою  $T_{снп}$  вологої водяної пари;  $v_{снп}$  – питомий об'єм сухої насиченої пари за абсолютним тиском  $p_{снп}$  сухої насиченої пари і термодинамічною температурою  $T_{снп}$  вологої водяної пари;  $v_c$  – питомий об'єм вологої водяної пари за критичною точкою вологої водяної пари (абсолютним тиском  $p_c$  вологої водяної пари і термодинамічною температурою  $T_c$  вологої водяної пари, які відповідно приймають значення [5]  $p_c = 22,064$  Мпа і  $T_c = 647,096$  К). Питомий об'єм вологої водяної пари за критичною точкою вологої водяної пари приймається таким, що дорівнює  $v_c = 0,00310559$  м<sup>3</sup>/кг.

Значення динамічної в'язкості  $\mu_{ввп}$  вологої водяної пари відповідно до [6] розраховують за рівнянням

$$\mu_{ввп} = (1 - \phi)\mu_{снп} + \phi\mu_v \quad (6)$$

де  $\mu_{снп}$  – динамічна в'язкість сухої насиченої пари [5];  $\mu_v$  – динамічна в'язкість води [5].

При виводі рівняння визначення абсолютного тиску  $p_{снп}$  сухої насиченої пари і термодинамічної температури  $T_{снп}$  сухої насиченої пари з рівняння (1) були допущені помилки.

Виходячи з вищевказаного, необхідно отримати нові рівняння для розрахунку значень

абсолютного тиску  $p_{снп}$  сухої насиченої пари і термодинамічної температури  $T_{снп}$  сухої насиченої пари з рівняння (1), а також розробити на базі даних рівнянь алгоритм визначення масової витрати  $q_{мввп}$  вологої водяної пари.

У випадку, якщо задана термодинамічна температура  $T_{снп}$  вологої водяної пари, то, застосовуючи рівняння (1), знайдемо рівняння для обчислення значення абсолютного тиску  $p_{снп}$  сухої насиченої пари. Абсолютний тиск  $p_{снп}$  сухої насиченої пари будуть визначати за рівнянням

$$p_{снп} = p^* \left( \frac{-B_s - \sqrt{B_s^2 - 4A_s S_s}}{2A_s} \right)^4, \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} A_s &= \vartheta^2 + n_1 \vartheta + n_2, \\ B_s &= n_3 \vartheta^2 + n_4 \vartheta + n_5, \\ C_s &= n_6 \vartheta^2 + n_7 \vartheta + n_8. \end{aligned}$$

У випадку, якщо заданий абсолютний тиск  $p_{снп}$  вологої водяної пари, то, застосовуючи рівняння (1), знайдемо рівняння для обчислення значення термодинамічна температура  $T_{снп}$  сухої насиченої пари. Термодинамічну температуру  $T_{снп}$  сухої насиченої пари будуть визначати за рівнянням

$$T_{снп} = T^* \frac{n_{10} + D_s - \sqrt{(n_{10} + D_s)^2 - 4(n_9 + n_{10} D_s)}}{2}, \quad (8)$$

де

$$\begin{aligned} D_s &= \frac{-F_s + \sqrt{F_s^2 - 4E_s G_s}}{2E_s}, \\ E_s &= \beta_s^2 + n_3 \beta_s + n_6, \\ F_s &= n_1 \beta_s^2 + n_4 \beta_s + n_7, \\ C_s &= n_2 \beta_s^2 + n_5 \beta_s + n_8. \end{aligned}$$

Крім того, слід врахувати, що найчастіше вимірюють не ступінь сухості  $x$  вологої водяної пари, а відносну вологість  $\phi$  вологої водяної пари, яка пов'язана зі ступінню сухості

вологої водяної пари рівнянням

$$\phi = 1 - x. \quad (9)$$

Підставивши рівняння (3)–(5) у рівняння (2) та врахувавши рівняння (8), отримаємо рівняння для визначення відносної вологості  $\phi$  вологої водяної пари як функцію питомого об'єму  $v_{ввп}$  вологої водяної пари,  $v_e$  води і  $v_{снп}$  сухої насиченої пари, а саме:

$$\phi = \frac{v_{снп} - v_{ввп}}{v_{снп} - v_e}. \quad (10)$$

Застосовувавши рівняння (9), запишемо рівняння для визначення питомого об'єму  $v_{ввп}$  вологої водяної пари

$$v_{ввп} = (1 - \phi)v_{снп} + \phi v_e. \quad (11)$$

Густина  $\rho$  середовища визначається через його питомий об'єм  $v$  таким рівнянням:

$$\rho = 1/v. \quad (12)$$

Виразивши у рівнянні (11) питомий об'єм середовища через густину середовища і підставивши їх у рівняння (12), отримаємо рівняння для визначення густини  $\rho_{ввп}$  вологої водяної пари через густину  $\rho_e$  води [3] та густину  $\rho_{снп}$  сухої насиченої пари, яка визначається через густину  $\rho_{nn}$  перегрітої пари [3] на лінії насичення [6]:

$$\rho_{ввп} = 1 / \left[ (1 - \phi) \frac{1}{\rho_{снп}} + \phi \frac{1}{\rho_e} \right]. \quad (13)$$

За значеннями абсолютного тиску  $p_{снп}$  сухої насиченої пари, термодинамічної температури  $T_{снп}$  сухої насиченої пари та густини  $\rho_{ввп}$  вологої водяної пари відповідно до [7] визначають динамічну в'язкість  $\mu_{ввп}$  вологої водяної пари.

Рівняння визначення масової витрати  $q_{мввп}$  вологої водяної пари запишеться так:

$$q_{мввп} = \frac{\pi}{4} d^2 C E K_{ш} K_n \varepsilon_{ввп} \sqrt{2 \Delta p \rho_{ввп}}, \quad (14)$$

де  $d$  - діаметр отвору діафрагми при робочій температурі середовища;  $C$  - коефіцієнт витікання діафрагми;  $E$  - коефіцієнт швидкості

входу;  $K_{ш}$  – поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу;  $K_n$  – поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми;  $\Delta p$  – перепад тиску на діафрагмі;  $\epsilon_{ввп}$  – коефіцієнт розширення вологої водяної пари.

Так як коефіцієнт розширення для води приймає таке значення, що дорівнює одиниці, а для сухої насиченої пари приймає таке значення, що дорівнює значенню  $\epsilon_{снп}$ , то коефіцієнт розширення  $\epsilon_{ввп}$  вологої водяної пари буде визначатись за рівнянням [6]

$$\epsilon_{ввп} = \varphi + (1 - \varphi)\epsilon_{снп}.$$

Застосовуючи рівняння (11) ÷ (14), запишемо алгоритм розрахунку витрати  $q_{мввп}$  вологої водяної пари за методом змінного перепаду тиску із стандартною діафрагмою, який виконують за такими початковими даними, як: спосіб відбору тиску; значення перепаду тиску  $\Delta p$  на діафрагмі; значення температури  $t$  середовища в °С або абсолютний тиск  $p_{снп}$  середовища; діаметр отвору діафрагми  $d_{20}$  за температури 20 °С; матеріал [8], з якого виготовлено діафрагму; внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу  $D_{20}$  за температури 20 °С; матеріал [8], з якого виготовлено вимірювальний трубопровід; в залежності від виду трубопроводу і його матеріалу, стану поверхні стінки вимірювального трубопроводу і умов експлуатації відповідно [8] вибирають еквівалентну шорсткість  $R_{ш}$ ; початковий радіус  $r_n$  вхідного канта та поточний час  $\tau$  (в роках) експлуатації діафрагми з моменту визначення значення початкового радіусу вхідної кромки діафрагми  $r_n$  [2]; відносна вологість  $\varphi$  вологої водяної пари.

Застосовуючи повну модель витратоміра змінного перепаду тиску, яка включає у себе усі рівняння та умови застосування методу змінного перепаду тиску, запишемо алгоритм розрахунку витрати вологої водяної пари за методом змінного перепаду тиску:

1) якщо задана температура  $t$  вологої водяної пари, то розраховують значення термодинамічної температури  $T_{снп}$  вологої водяної пари за рівнянням

$$T_{снп} = t + 273,15; \quad (16)$$

2) якщо задана температура  $t$  вологої водяної пари, то обчислюють значення абсолютного тиску  $p_{снп}$  сухої насиченої пари за рівнянням (7). Якщо ж заданий абсолютний тиск  $p_{снп}$  вологої водяної пари, то обчислюють значення термодинамічної температури  $T_{снп}$  сухої насиченої пари за рівнянням (8);

3) за рівнянням (13) розраховують значення густини  $\rho_{ввп}$  вологої водяної пари, а за рівнянням наведеним у [8] обчислюють значення динамічної в'язкості  $\mu_{ввп}$  вологої водяної пари;

4) відповідно до [8] розраховують значення коефіцієнта  $K_{zn}$ , що враховує зміну діаметра отвору діафрагми, зумовлену відхиленням температури середовища від 20°С, за яким обчислюють значення діаметра  $d$  отвору діафрагми при робочій температурі середовища;

5) відповідно до [8] розраховують значення коефіцієнта  $K_m$ , що враховує зміну діаметра вимірювального трубопроводу, зумовлену відхиленням температури середовища від 20 °С, за яким обчислюють значення внутрішнього діаметра  $D$  вимірювального трубопроводу при робочій температурі середовища;

6) обчислюють значення відносного діаметра  $\beta$  діафрагми відповідно до [8];

7) відповідно до [8] за значенням  $\beta$  розраховують значення коефіцієнта швидкості входу  $E$ ;

8) відповідно до [2] розраховують значення поточного радіуса  $r_k$  притуплення вхідного канта діафрагми, за значенням якого та діаметром отвору діафрагми  $d$  обчислюють значення поправкового коефіцієнта  $K_n$ , що враховує притуплення вхідного канта діафрагми;

9) відповідно до [2] розраховують значення коефіцієнта розширення  $\epsilon_{снп}$  сухої насиченої пари, за значенням якої та за значенням відносної вологості  $\varphi$  вологої водяної пари обчислюють за рівнянням (15) значення коефіцієнта розширення  $\epsilon_{ввп}$  вологої водяної пари;

10) приймають перше наближення числа Рейнольдса  $Re_1$  таким, що дорівнює  $10^6$ ;

11) відповідно до [2] розраховують

значення коефіцієнта витікання  $C_1$  діафрагми;

12) для діафрагми відповідно до [2] визначають мінімально та максимально допустимі значення відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу:

13) відповідно до [2] визначають поправковий коефіцієнт  $K_{ш1}$ , що враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу;

14) за рівнянням (14) розраховують значення масової витрати  $q_{мввп1}$  вологої водяної пари;

15) уточнюють значення числа Рейнольдса  $Re_2$  за рівнянням

$$Re_2 = \frac{4 \cdot q_{мввп1}}{\pi D \mu_{мввп}}, \quad (16)$$

за яким уточнюють коефіцієнта витікання  $C_2$  відповідно до перерахунку 11), допустиме значення відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу відповідно до перерахунку 12), поправкового коефіцієнта, що враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу  $K_{ш2}$  відповідно до перерахунку 13) та перераховують значення масової витрати  $q_{мввп}$  вологої водяної пари відповідно до перерахунку 14);

16) перерахунок значень  $Re$ ,  $C$ ,  $K_{ш}$  та  $q_{мввп}$  здійснюють доти, доки значення відносного відхилення  $\delta_{q_{мввпi}}$  між отриманим значенням витрати  $q_{мввпi}$  і його попереднім значенням  $q_{мввпi-1}$  буде задовольняти умову

$$\delta_{q_{мввпi}} = 100 \frac{|q_{мввпi-1} - q_{мввпi}|}{q_{мввпi}}. \quad (17)$$

Звичайно, значення  $\delta_{q_{мввпi}}$  може бути і іншим – це визначається заданою необхідною точністю обчислення масової витрати  $q_{мввп}$  вологої водяної пари;

17) значення  $q_{мввпi}$  буде шуканим значенням масової витрати  $q_{мввп}$  вологої водяної пари.

Якщо одиниці масової витрати  $q'_{мввп}$  вологої водяної пари задані відмінними від одиниць системи СІ, то значення масової витрати  $q'_{мввп}$  вологої водяної пари перераховують за рівнянням

$$q'_{мввп} = k_{q_m} q_{мввп}, \quad (18)$$

де  $k_{q_m}$  – перевідний коефіцієнт для одиниць масової витрати середовища, значення якого подані в табл. 2.

Вказана система рівнянь перевіряється умовами застосування методу змінного перепаду тиску, застережених в ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,5:2009 [8, 1, 2].

**Таблиця 2 – Значення перевідного коефіцієнта  $k_{q_m}$  для одиниць витрати середовища**

Одиниці масової витрати середовища	Перевідний коефіцієнт
$q_{мввп}$	$q'_{мввп}$
кг/с	кг/ГОД
кг/с	т/с
кг/с	т/ГОД
	$3600 \text{ с/год}$
	$0,001 \text{ т/кг}$
	$10^{-6} \text{ (т/ГОД)}$
	$3,6 \text{ (кг/с)}$

## ВИСНОВКИ

Розроблені рівняння (7) і (8) дозволять обчислювати значення абсолютного тиску  $P_{снп}$  сухої насиченої пари і термодинамічної температури  $T_{снп}$  сухої насиченої пари. Дані рівняння рекомендується для введення у нормативні документи із властивостей води та водяної пари. Рівняння визначення коефіцієнта розширення  $\epsilon_{ввп}$  вологої водяної пари та алгоритм розрахунку масової витрати  $q_{мввп}$  вологої водяної пари рекомендується для введення у нормативні документи з вимірювання витрати та кількості середовища, що дозволить програмувати обчислювачі витрати та кількості вологої водяної пари та вимірювальні комплекси.

1. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.2–2005 (ИСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, NEQ) : ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. – [Чинний від 2010–04–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 89 с. 2. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 5. Методика виконання

вимірювань. (ГОСТ 8.586.5–2005, IDT) : ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. – [Чинний від 2010–04–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 196 с. 3. Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam // The International Association for the Properties of Water and Steam. - IAPWS Secretariat, 1997. – 48 p. 4. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980.- 424 с. 5. Вукалович М. П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А.А. Александров. - М.: Изд-во стандартов, 1969. 6. Методический материал по применению РД50-213-83. – Казань: Издательство стандартов, 1983. 7. Revised Release on the IAPWS Formulation 1985 for the

Viscosity of Ordinary Water Substance.- IAPWS Secretariat: Denmark, 2003. – 15 p. 8. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювань та загальні вимоги. (ГОСТ 8.586.1–2005 (ИСО 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003, NEQ) : ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. – [Чинний від 2010–04–01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 98 с.

**Поступила в редакцію 26.05.2011р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Середюк О.Є.**