

Е. П. Пистун, Л. В. Лесовой

**ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ И
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

С введением комплекса межгосударственных стандартов ГОСТ8.586.1,2,3,4,5–2005 [1, 2, 3, 4, 5], а также новых коэффициентов уравнения расхода среды, возникает много вопросов по алгоритмам расчета расхода и количества воды и количества тепловой энергии, которая переносится горячей водой.

В статье приведен алгоритм расчета расхода и количества воды, а также расхода и количества тепловой энергии по методу переменного перепада давления со стандартной диафрагмой, который соответствует требованиям комплексу межгосударственных стандартов ГОСТ8.586.1,2,3,4,5–2005.

Для расчета количества тепловой энергии E , которая в свою очередь зависит от массового расхода воды q_m , необходимо следующие исходные данные:

- способ отбора давления;
- значение абсолютного давления p воды при измерении давления воды манометром абсолютного давления или текущее значения избыточного давления p_u воды и атмосферного давления p_a при измерении давления воды манометром избыточного давления;
- значение перепада давления Δp ;
- значение температуры t воды в $^{\circ}\text{C}$;
- значение диаметра отверстия диафрагмы d_{20} при температуре 20°C ;
- материал изготовления диафрагмы (см. табл. Г.1 [1]). В случае отсутствия выбранного материала в [1] необходимо задать значение коэффициента α_{lcy} линейного расширения материала изготовления диафрагмы;
- значения начального радиуса r_n входной кромки диафрагм и текущего времени τ_T эксплуатации диафрагмы с момента определения значения начального радиуса входной кромки диафрагмы r_n , год, [2];
- значение внутреннего диаметра измерительного трубопровода (ИТ) D_{20} на входе диафрагмы или камеры усреднения при ее наличии при температуре 20°C ;
- материал изготовления ИТ (см. табл. Г.1 [1]). В случае отсутствия выбранного материала в [1] необходимо задать значение

коэффициента α_{tT} линейного расширения материала изготовления ИТ;

- в зависимости от вида трубопровода и его материала, состояния поверхности стенки ИТ и условий эксплуатации (см. табл. Д.1 [1], [6]) выбирают значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости Ra или эквивалентной шероховатости $R_{ш}$ внутренней поверхности ИТ. В случае отсутствия в [1] вида трубопровода и его материала, состояния поверхности стенки ИТ и условий эксплуатации, необходимо измерить Ra или $R_{ш}$.

После задания исходных данных производят расчет промежуточных данных согласно следующему алгоритму:

а) при измерении давления p_u воды манометром избыточного давления воды и атмосферного давления p_a определяют значение абсолютного давления p воды по уравнению

$$p = p_u + p_a ; \quad (1)$$

б) рассчитывают значение термодинамической температуры T воды по уравнению

$$T = t + 273,15 ; \quad (2)$$

в) рассчитывают значение плотности воды ρ по уравнению

$$\rho = \frac{1}{v} , \quad (3)$$

где v – удельный объем воды, значение которого согласно [7] определяется по уравнению

$$v = -1000 \frac{R \cdot T \cdot \pi}{p} \cdot \sum_{i=1}^{34} n_i \cdot I_i \cdot (7,1 - \pi)^{I_i - 1} \cdot (\tau - 1,222)^{J_i} , \quad (4)$$

R – газовая постоянная для воды, которая равна $R = 461,526 \frac{Дж}{кг \cdot К}$;

π – псевдоприведенное давление, значение которого рассчитывается по уравнению

$$\pi = \frac{p}{16,53 \cdot 10^6} ; \quad (5)$$

τ – псевдоприведенная температура, значение которой рассчитывают по уравнению

$$\tau = \frac{1386}{T} ; \quad (6)$$

n_i, I_i, J_i – постоянные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения постоянных коэффициентов n_i, I_i, J_i уравнения (4)

i	n_i	I_i	J_i
1	0,14632971213167	0	-2
2	-0,84548187169114	0	-1
3	-0,37563603672040·10 ⁺¹	0	0
4	0,33855169168385·10 ⁺¹	0	1
5	-0,95791963387872	0	2
6	0,15772038513228	0	3
7	-0,16616417199501·10 ⁻¹	0	4
8	0,81214629983568·10 ⁻³	0	5
9	0,28319080123804·10 ⁻³	1	-9
10	-0,60706301565874·10 ⁻³	1	-7
11	-0,18990068218419·10 ⁻¹	1	-1
12	-0,32529748770505·10 ⁻¹	1	0
13	-0,21841717175414·10 ⁻¹	1	1
14	-0,52838357969930·10 ⁻⁴	1	3
15	-0,47184321073267·10 ⁻³	2	-3
16	-0,30001780793026·10 ⁻³	2	0
17	0,47661393906987·10 ⁻⁴	2	1
18	-0,44141845330846·10 ⁻⁵	2	3
19	-0,72694996297594·10 ⁻¹⁵	2	17
20	-0,31679644845054·10 ⁻⁴	3	-4
21	-0,28270797985312·10 ⁻⁵	3	0
22	-0,85205128120103·10 ⁻⁹	3	6
23	-0,22425281908000·10 ⁻⁵	4	-5
24	-0,65171222895601·10 ⁻⁶	4	-2
25	-0,14341729937924·10 ⁻¹²	4	10
26	-0,40516996860117·10 ⁻⁶	5	-8
27	-0,12734301741641·10 ⁻⁸	8	-11
28	-0,17424871230634·10 ⁻⁹	8	-6
29	-0,68762131295531·10 ⁻¹⁸	21	-29
30	0,14478307828521·10 ⁻¹⁹	23	-31
31	0,26335781662795·10 ⁻²²	29	-38
32	-0,11947622640071·10 ⁻²²	30	-39

33	$0,18228094581404 \cdot 10^{-23}$	31	-40
34	$-0,93537087292458 \cdot 10^{-25}$	32	-41

г) рассчитывают значение энтальпии воды h согласно уравнению [7]

$$h_{\tau} = 1386R \sum_{i=1}^{34} n_i (7,1 - \pi)^{I_i} j_i (\tau - 1,222)^{J_i - 1}. \quad (7)$$

д) соответственно с [8] рассчитывают значения динамической вязкости воды μ по уравнению

$$\mu = 5,5071 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_0 \cdot \mu_1, \quad (8)$$

где

$$\mu_0 = \frac{\sqrt{T_{\mu}}}{3 \sum_{i=0} H_{0i} \cdot T_{\mu}^{-i}}; \quad (9)$$

$$T_{\mu} = \frac{T}{647,226}; \quad (10)$$

$$\mu_1 = \exp \left[\rho_{\mu} \cdot \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^6 H_{1ij} \cdot \left(\frac{1}{T_{\mu}} - 1 \right)^i \cdot (\rho_{\mu} - 1)^j \right]; \quad (11)$$

$$\rho_{\mu} = \frac{\rho}{317,763}; \quad (12)$$

H_{0i} , H_{1ij} – постоянные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2 – Значения коэффициентов H_{0i} уравнения (9).

i	0	1	2	3
H_{0i}	1.0	0.978197	0.579829	-0.202354

Таблица 3 – Значения коэффициентов H_{1ij} уравнения (10).

$i \setminus j$	0	1	2	3
0	0,5132047	0,2151778	-0,2818107	0,1778064

1	0,3205656	0,7317883	-1,070786	0,460504
2	0	1,241044	-1,263184	0,2340379
3	0	1,476783	0	-0,4924179
4	-0,7782567	0	0	0
5	0,1885447	0	0	0
<i>i \ j</i>	4	5	6	
0	-0,0417661	0	0	
1	0	-0,01578386	0	
2	0	0	0	
3	0,1600435	0	-0,003629481	
4	0	0	0	
5	0	0	0	

е) рассчитывают значение коэффициента K_{cy} , учитывающего изменение диаметра отверстия диафрагмы, вызванное отклонением температуры среды от 20 °С, по уравнению [1]

$$K_{cy} = 1 + \alpha_{icy}(t - 20). \quad (13)$$

Если заданный материал изготовления диафрагмы соответствует материалу, приведенному в [1], то значение α_{icy} определяют по уравнению

$$\alpha_{icy} = 10^{-6} \left[a_0 + a_1 \left(\frac{t}{1000} \right) + a_2 \left(\frac{t}{1000} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

где a_0, a_1, a_2 – постоянные коэффициенты, определяемые в соответствии с [1]

ж) рассчитывают значение диаметра d отверстия диафрагмы при рабочей температуре по уравнению [1]

$$d = d_{20} K_{cy}; \quad (15)$$

з) рассчитывают значение коэффициента K_T , учитывающего изменение диаметра ИТ, вызванное отклонением температуры среды от 20 °С, по уравнению [1]

$$K_T = 1 + \alpha_{iT}(t - 20). \quad (16)$$

Если заданный материал изготовления ИТ соответствует материалу, приведенному в [1], то значение α_{iT} определяют по уравнению (14), но для материала изготовления ИТ;

и) рассчитывают значение внутреннего диаметра ИТ D на входе диафрагмы или камеры усреднения, при ее наличии, при рабочей температуре по уравнению [1]

$$D = D_{20} K_T; \quad (17)$$

к) рассчитывают значение относительного диаметра β диафрагмы по уравнению [1]

$$\beta = \frac{d}{D}; \quad (18)$$

л) по значению β рассчитывают значение коэффициента скорости входа E [1]

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}; \quad (19)$$

м) рассчитывают значение текущего радиуса r_k притупления входной кромки диафрагмы по уравнению [2]

$$r_k = 0,0002 - (0,0002 - r_n) \cdot e^{-\frac{\tau_T}{3}}, \quad (20)$$

по значению которого и значению диаметра отверстия d диафрагмы определяют поправочный коэффициент K_n , учитывающий притупление входной кромки диафрагмы, как [2]

$$K_n = \begin{cases} 1 & \text{при } r_k/d \leq 0,0004 \\ 0,9826 + (r_k/d + 0,0007773)^{0,6} & \text{при } r_k/d > 0,0004 \end{cases}. \quad (21)$$

После расчета промежуточных величин приступают к расчету расхода тепловой энергии q_3 , которая переносится водой. Расход тепловой энергии выполняется по следующему алгоритму:

а) принимают первое приближение числа Рейнольдса $Re_1 = 10^6$;

б) рассчитывают коэффициент истечения C_1 по уравнению Reader-Harris/Gallagher [2]

$$\begin{aligned} C_1 = & 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + \\ & + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_1} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_1} \right)^{0,3} + \\ & + (0,043 + 0,08 \cdot e^{-10 \cdot L_1} - 0,123 \cdot e^{-7 \cdot L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - \\ & - 0,031 \cdot (M'_2 - 0,8 \cdot M'_2{}^{1,1}) \cdot \beta^{1,3} + M_3 \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_1} \right)^{0,8}; \quad (23)$$

$$M'_2 = \frac{2 \cdot L'_2}{1 - \beta}; \quad (24)$$

$$M_3 = \begin{cases} 0 & \text{при } D \geq 0,07112 (2,8") \\ 0,011 \cdot (0,75 - \beta) \cdot \left(2,8 - \frac{D}{0,0254} \right) & \text{при } D < 0,07112 (2,8") \end{cases}. \quad (25)$$

Коэффициенты L_1 та L'_2 зависимо от типа диафрагмы рассчитывают соответственно по уравнениям:

– для диафрагм с угловым способом отбора давления

$$L_1 = L_2 = 0; \quad (26)$$

– для диафрагм с фланцевым способом отбора давления

$$L_1 = \begin{cases} 0,4333 & \text{при } D \leq 0,05862 \text{ м} \\ \frac{0,0254}{D} & \text{при } D > 0,05862 \text{ м} \end{cases}; \quad (27)$$

$$L_2 = \frac{0,0254}{D}; \quad (28)$$

– для диафрагм с трехрадиусным способом отбора давления

$$L_1 = 1; \quad (29)$$

$$L_2 = 0,47. \quad (30)$$

в) если задана эквивалентная шероховатость $R_{ш}$ внутренней поверхности ИТ, то рассчитывают значение среднего арифметического отклонения профиля шероховатости ИТ Ra по уравнению

$$Ra = \frac{R_{ш}}{\pi}. \quad (31)$$

По значениям Re_1 , D , b и Ra определяют значение поправочного коэффициента, учитывающего шероховатость внутренней поверхности ИТ $K_{ш1}$ по уравнению [2]

$$K_{ш1} = \begin{cases} 1 & \text{при } Ra_{\min} < Ra < Ra_{\max} \\ 1 + 5,22\beta^{3,5} (\lambda - \lambda^*) & \text{при } Ra \leq Ra_{\min} \text{ и } Ra \geq Ra_{\max} \end{cases}, \quad (32)$$

где l и l^* – коэффициенты гидравлического трения, рассчитанные для действительного значения числа Рейнольдса Re_1 и соответственно значении Ra ИТ и при допустимом значении Ra^* ; Ra_{\max} –

максимальное значение среднего арифметического отклонения профиля шероховатости ИТ; Ra_{min} – минимальное значение среднего арифметического отклонения профиля шероховатости ИТ.

Значения λ и λ^* рассчитываются по уравнению

$$\lambda = \left\{ 1,74 - 2 \cdot \lg \left[\frac{2 \cdot A_u}{D} - \frac{37,36 \cdot \lg(k_D - k_R \cdot \lg(k_D + 3,3333 \cdot k_R))}{Re_1} \right] \right\}^{-2}, \quad (33)$$

где значения A_u , k_D и k_R определяют согласно табл. 4.

Таблица 4 – Значения величин A_u , k_D и k_R .

Величина	Значение величины для расчета	
	λ	λ^*
A_u	R_u или $\pi \cdot Ra$	$\pi \cdot Ra_{max}$ при $Ra > Ra_{max}$ $\pi \cdot Ra_{min}$ при $Ra < Ra_{min}$
k_D	$0,26954 \cdot R_u / D$ или $0,26954 \cdot \pi \cdot Ra / D$	$0,26954 \cdot \pi \cdot Ra_{max}$ при $Ra > Ra_{max}$ $0,26954 \cdot \pi \cdot Ra_{min}$ при $Ra < Ra_{min}$
k_R	$\frac{5,035}{Re_1}$	

Значение Ra_{max} определяется из уравнений

$$10^4 \cdot \frac{Ra_{max}}{D} = \begin{cases} 0,718866 \cdot \beta^{-3,887} + 0,364 & \text{при } Re_1 \leq 10^4 \\ A_0 \cdot \beta^{A_1} + A_2 & \text{при } Re_1 > 10^4 \text{ и } \beta < 0,65 \\ A_0 \cdot 0,65^{A_1} + A_2 & \text{при } Re_1 > 10^4 \text{ и } \beta \geq 0,65 \end{cases}, \quad (34)$$

где A_0 , A_1 , A_2 – коэффициенты, зависящие от числа Re и рассчитанные по уравнению

$$A_i = \sum_{k=0}^3 B_k \cdot [\lg(Re_1)]^k; \quad (35)$$

B_k – постоянные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 5.

Если в результате расчета, выполненного по формуле (34), полученное значение $10^4 \cdot \frac{Ra_{max}}{D} > 15$, то принимают

$Ra_{\max} = 15 \cdot 10^{-4} \cdot D$. Значение $10^4 \cdot \frac{Ra_{\max}}{D}$ округляют до двух значащих цифр.

Таблица 5 - Значения коэффициентов B_k уравнения (38)

Коэффициент	Значение коэффициентов B_k		
	A_0	A_1	A_2
$10^4 < Re_1 \leq 10^5$			
B_0	8,87	6,7307	-10,244
B_1	-3,7114	-5,5844	5,7094
B_2	0,41841	0,732485	-0,76477
B_3	0	0	0
$10^5 < Re_1 \leq 3 \cdot 10^6$			
B_0	27,23	-25,928	1,7622
B_1	-11,458	12,426	-3,8765
B_2	1,6117	-2,09397	1,05567
B_3	-0,07567	0,106143	-0,076764
$3 \cdot 10^6 < Re_1 \leq 10^8$			
B_0	16,5416	322,594	-92,029
B_1	-6,60709	-132,2	37,935
B_2	0,88147	17,795	-5,1885
B_3	-0,039226	-0,799765	0,23583

Значение Ra_{\min} определяется из уравнений

$$10^4 \cdot \frac{Ra_{\min}}{D} = \begin{cases} 7,1592 - 12,387 \cdot \beta - (2,0118 - 3,469 \cdot \beta) \cdot \lg(Re_1) + \\ \quad + (0,1382 - 0,23762 \cdot \beta) \cdot [\lg(Re_1)]^2 & \text{при } \beta < 0,65 \\ -0,892353 + 0,24308 \cdot \lg(Re_1) - \\ \quad - 0,0162562 \cdot [\lg(Re_1)]^2 & \text{при } \beta < 0,65 \\ 0 & \text{при } Re_1 < 3 \cdot 10^6 \end{cases} \quad (36)$$

Если в результате расчета, выполненного по формуле (36), получено значение $10^4 \cdot \frac{Ra_{\min}}{D} < 0$, то принимают $Ra_{\min} = 0$.

Значение $10^4 \cdot \frac{Ra_{\min}}{D}$ округляют до трех цифр после запятой;

г) рассчитывают массовый расход воды по уравнению [5]

$$q_{m1} = 0,25\pi d^2 C_1 E K_{u1} K_n \sqrt{2\Delta p \rho} ; \quad (37)$$

д) уточняют значения Рейнольдса Re_2 по уравнению [5]

$$Re_2 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_{m1}}{D \cdot \mu} , \quad (38)$$

по которому рассчитывают значения коэффициента истечения C_2 , значение поправочного коэффициента, учитывающего шероховатость внутренней поверхности ИТ K_{u2} и пересчитывают значение массового расхода воды q_{m2} соответственно по перечислению б), в) и г);

е) пересчет значений Re , C , K_{u1} та q_{mi} делают до тех пор пока значение относительного отклонения $d_{q_{mi}}$ между полученными значениями массового расхода воды q_{mi} и его предыдущим значением q_{mi-1} будет удовлетворять условию [5]

$$\delta_{q_{mi}} = 100 \frac{|q_{mi-1} - q_{mi}|}{q_{mi}} < 10^{-3} . \quad (39)$$

Конечно, значение $\delta_{q_{mi}}$ может быть и более – эта неопределенность задана необходимой точностью вычисления расхода тепловой энергии, которая переносится водой;

ж) значение q_{mi} будет искомым значением массового расхода воды;

з) рассчитывают расход тепловой энергии q_3 , которая переносится водой, по уравнению

$$q_3 = h \cdot q_m . \quad (40)$$

Количество тепловой энергии E_3 , которая переносится водой, определяют путем интегрирования функции $q_3(\tau)$ по времени с помощью уравнения

$$E_3 = \int_{\tau_n}^{\tau_k} q_3(\tau) d\tau , \quad (41)$$

где τ_n , τ_k – соответственно начало и конец времени, на протяжении которого происходит измерение количества тепловой энергии E_3 .

В зависимости от способа интегрирования и интервала дискретизации, определение количества тепловой энергии E_3 происходит аналогично определению количества среды, алгоритм которого приведен в [5].

Данный алгоритм расчета количества тепловой энергии E_9 позволит повысить точность измерения E_9 и избежать неточностей и вопросов, которые возникают при измерении этой величины.

Литература

1. ГОСТ 8.586.1—2005 (ИСО 5167-1:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
2. ГОСТ 8.586.2—2005 (ИСО 5167-2:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования.
3. ГОСТ 8.586.3—2005 (ИСО 5167-3:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.
4. ГОСТ 8.586.4—2005 (ИСО 5167-4:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 4. Трубы Вентури. Технические требования.
5. ГОСТ 8.586.5—2005 (ИСО 5167). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям /Под ред. М.О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
7. 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.
8. Revised Release on the IAPWS Formulation 1985 for the Viscosity of Ordinary Water Substance, IAPWS Secretariat 2003.

Сведения об авторах:

Пистун Евгений Павлович, проф., д.т.н., заведующий кафедрой
Государственного университета «Львовская политехника»,
Адрес: 290646, Украина, г. Львов, ул. Ст. Бандеры, 12.
тел./факс - (38 0322) 727761; тел. - (38 0322) 398516.
E- mail - epistun@polynet.lviv.ua

Лесовой Леонид Васильевич, к.т.н., доцент этой же кафедры.
E- mail - acit@polynet.lviv.ua