

6. Антонова Л. Н. Водозаборно-водовыпускные сооружения совмещенного типа на водохранилищах-охладителях ТЭС и АЭС [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Л. Н. Антонова. — Харьков : ХГТУСиА, 1996. — 132 с.
7. Лаппо Д. Д. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения [Текст] / Д. Д. Лаппо, С. С. Стрекалов, В. К. Завьялов. — Л. : ВНИИГ, 1990. — 432 с.

*На базі системи диференційних рівнянь тепломасообміну в скруберах отримано систему лінійних алгебраїчних рівнянь з чотирма невідомими. Система рівнянь дає якісну оцінку протікання процесу політропного охолодження і зволоження повітря у скруберах.*

*Ключові слова: тепломасообмін, скрубер, вологе повітря.*

---

*На базе системы дифференциальных уравнений тепломассообмена в скруберах получена система линейных алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными. Система уравнений дает качественную оценку протекания процесса политропный охлаждения и увлажнения воздуха в скруберах.*

*Ключевые слова: тепломассообмен, скрубер, влажный воздух.*

---

*On the basis of differential equations of heat-mass exchange in the scrubber have got the system of linear algebraic equations with four unknowns. The system of equations gives a qualitative evaluation of a process polytropic cooling and humidifying the air in the scrubber.*

*Keywords: heat-mass exchange, scrubber, air.*

УДК 536.27

# МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОНОСІЇВ У СКРУБЕРНИХ ПРОЦЕСАХ

**І. М. Кузьменко**

Кандидат технічних наук, доцент\*

**Контактний тел.:** 068-375-79-43

**E-mail:** ozirno@ukr.net

**М. В. Ногін**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*

**Контактний тел.:** 097-277-23-90

**О. О. Крячок**

Кандидат технічних наук, доцент\*

**Контактний тел.:** 068-363-70-00

**E-mail:** kryachok@apeps.kpi.ua

**Т. Л. Зоуля**

Магістрант\*

**Контактний тел.:** 066-205-53-84

**E-mail:** zya\_zya@ua.fm

\*Кафедра автоматизації проектування

енергетичних процесів та систем

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, корпус 5, м. Київ, 03056

## 1. Вступ

Для вологої очистки відпрацьованих газів від пилу та зниження їх температури застосовують скрубери. Наприклад, у доменному виробництві, на сміттєспалювальних заводах та ін. Конструктивно скрубери з насадками мають ряд переваг. Зокрема, вони можуть працювати в плівковому або барботажному режимах. Проте, на даний час не існує прийнятної методики розрахунку насадкових скрубєрів, оскільки в апараті протікають одночасно процеси зволоження, нагрівання (охолодження), які залежать від параметрів теплоносіїв. Саме тому задача розробки методики розрахунку скрубєрів є важливою та актуальною.

## 2. Постановка проблеми

Робота виконується у відповідності до теми 0111U006241 «Методи розрахунків та моделювання енергозберігаючого обладнання». Для розробки методів було вивчено кілька варіантів моделей, що описують

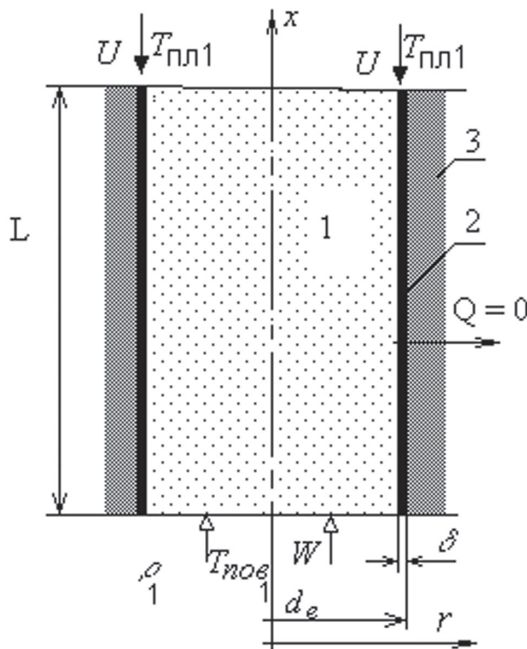
процеси в скрубєрах [1–5]. Проте, існуючі методи розрахунків ґрунтуються на вирішенні системи диференційних рівнянь, що потребує чисельного розв'язання. Це значно ускладнює процес розрахунку кінцевих параметрів при протіканні процесів зволоження та охолодження газу в скрубєрах. Тому метою роботи є розробка прийнятної методики розрахунку скрубєрів як контактних апаратів. У роботі розглянуто постановку задачі у вигляді системи диференційних рівнянь та отримано її аналітичний розв'язок [4–5].

## 3. Методика розрахунку

З поміж напівемпіричних способів розрахунку контактних апаратів розглянемо модель протитокового контактного підігрівача рідини зі зрошуваною регулярною насадкою [4]. Така математична модель описує процеси переносу тепла в плівці води, між плівковою водою та повітрям і маси пари між плівковою водою й повітрям.

Оскільки рівняння моделі описують протитоковий рух у контактному апараті, граничні умови задано на

протилежних кінцях області розрахунку, як показано на рис. 1. Вода у вигляді плівки 2 з температурою  $T_{пл1}$ , стікаючи по насадці висотою  $L$  зі швидкістю  $U$ , випаровується за рахунок тепла від води і повітря 1, що надходить із температурою  $T_{пов1}$  і швидкістю  $W$  у нижню частину насадки. Температура води в плівці стає  $T_{пл2}$ , оскільки вона віддає тепло на випаровування, а повітря —  $T_{пов2}$ . За цих умов між повітрям і водою відбувається конвекція тепла від повітря до води і дифузія пари з поверхні водяної плівки.



**Рис. 1.** Схема тепломасообміну між водою і повітрям в скрубєрі: 1 — повітря; 2 — плівка води; 3 — адіабатна стінка

Запишемо диференційні рівняння переносу тепла і маси в плівці і газі в циліндричних координатах за стаціонарних умов. Рівняння перенесення тепла в воді

$$W \frac{\partial T_{пл}}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(a_r + a_f) \frac{\partial T_{пл}}{\partial r} \right]. \quad (1)$$

Рівняння перенесення тепла в повітрі

$$W \frac{\partial T_{пов}}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(a_r + a_f) \frac{\partial T_{пов}}{\partial r} \right]. \quad (2)$$

Рівняння перенесення маси пари в повітрі

$$W \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(D_a + D_a^T) \frac{\partial \rho}{\partial r} \right]. \quad (3)$$

Індекс «m» враховує коефіцієнти перенесення за рахунок турбулентності.

Введемо такі припущення: задача є симетричною та стаціонарною  $\frac{\partial T_{пов}}{\partial x} = 0$ ,  $\frac{\partial \rho}{\partial r} = 0$  за  $r = 0$ ; тепловий потік назовні відсутній  $Q = 0$ ; температури повітря та води на границі контакту є рівними  $T_{пов} = T_{пл} = T_{пл \delta}$  за  $r = \frac{d_e}{2} - \delta$ ; рух газу та рідини зустрічний і направлений по вертикалі, тому граничні умови задано на різних ділянках  $T_{пл} = T_{пл1}$  за  $x = 0$  і  $T_{пов} = T_{пов1}$ ,  $\rho = \rho_1$  за  $x = L$ , товщиною плівки нехтуємо  $\delta = 0$ .

Врахуємо, що, відповідно до теплового балансу, вода випаровується за рахунок тепла від повітря  $Q_{пов}$  і від самої води  $Q_{пл}$ , тобто,  $Q_{пов} + Q_{пл} = Q_{вип}$ .

Рівняння локального теплового балансу запишемо, виразивши тепло згідно закону Ньютона-Ріхмана. Після скорочення на площу теплообміну, отримаємо:

$$\alpha \langle (T_{пов}) - T_{пл \delta} \rangle + \alpha_{пл} \langle (T_{пл}) - T_{пл \delta} \rangle = \beta(\rho_{\delta} - \langle \rho \rangle).$$

Для спрощення диференційних рівнянь (1–3) врахуємо граничні умови III роду  $\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha \Delta t$  та перейдемо до середніх значень по координаті  $r$ :

$$\langle W \rangle c_p \frac{d \langle T_{пл} \rangle}{dx} \frac{d_e}{2} = -\alpha_{пл} \langle (T_{пл}) - T_{пл \delta} \rangle;$$

$$\langle W \rangle c_p \frac{d \langle T_{пов} \rangle}{dx} \frac{d_e}{2} = -\alpha_{пов} \langle (T_{пов}) - T_{пл \delta} \rangle;$$

$$\langle W \rangle \frac{d \langle \rho \rangle}{dx} \frac{d_e}{2} = \beta(\rho_{\delta} - \langle \rho \rangle),$$

де кутові дужки означають середні значення по  $g$ . В останньому рівнянні виразимо густину пари як функцію від температури плівки. Густину пари на межі повітря — вода обчислимо у відповідності до моделі еквівалентної плівки Нернста [3]. Вираз (4) отримано методом найменших квадратів на основі табличних даних для температур  $10 \div 140$  °C [5]:

$$\rho_{\delta} = 0,223805 - 0,01130886 \cdot T_{пл \delta} + 1,75900332 \cdot 10^{-4} \cdot T_{пл \delta}^2. \quad (4)$$

Відносна похибка вищенаведеної залежності не перевищує 1%. Тепер виразимо швидкість з рівняння нерозривності  $\langle W \rangle = G_{пов} / \rho \cdot \pi \cdot (d_e/2)^2$  і запишемо диференційні рівняння у такому вигляді:

$$\frac{d \langle T_{пл} \rangle}{dx} = -\frac{\pi(d_e/2)}{G \cdot c} \cdot \alpha_{пл} \cdot \langle (T_{пов}) - T_{пл \delta} \rangle; \quad (5)$$

$$\frac{d \langle T_{пов} \rangle}{dx} = -\frac{\pi(d_e/2)}{G_{пов} \cdot c} \cdot \alpha_{пов} \cdot \langle (T_{пов}) - T_{пл \delta} \rangle; \quad (6)$$

$$\frac{d \langle \rho \rangle}{dx} = \frac{\pi(d_e/2)}{G_{пов} \cdot c} \cdot \rho \cdot \beta \cdot (\rho_{\delta}(T_{пл \delta}) - \langle \rho \rangle). \quad (7)$$

Рівняння (5–7) зводяться до задачі Коші для диференційного рівняння з відокремлюваними змінними  $\frac{dx}{dt} = a \cdot (x - b)$ , що при початкових умовах  $x(t = 0) = c$  має розв'язок  $x(t) = b + (c - b) \cdot e^{(a \cdot t)}$ .

Таким чином, за початкових умов  $T_{пов} = T_{пов}^{вх}$ ,  $\rho = \rho^{вх}$  при  $x = 0$ , маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь з чотирма невідомими:

$$\begin{cases} T_{пл} = T_{пл \delta} + (T_{пл1} - T_{пл \delta}) \exp(-Ax); \\ T_{пов} = T_{пл \delta} - \frac{(T_{пл \delta} - T_{пов1})}{\exp(-A \cdot L)} \exp(Ax); \\ \rho = \rho_{\delta}(T_{пл \delta}) - \frac{(\rho_{\delta}(T_{пл \delta}) - \rho_1)}{\exp(BL)} \exp(Bx); \\ \alpha_{пл}(T_{пл \delta} - T_{пл}) + \alpha_{пов}(T_{пов} - T_{пл \delta}) = r\beta(\rho_{\delta}(T_{пл \delta}) - \rho), \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{де } A = \frac{\pi(d_e/2)}{G_{\text{пл}c}} \alpha_{\text{пл}}, \quad A^* = \frac{\pi(d_e/2)}{G_{\text{пов}c}} \alpha_{\text{пов}}, \quad B = \frac{\pi(d_e/2)}{G_{\text{пов}c}} \rho \beta.$$

Чисельний розв'язок системи лінійних рівнянь (8) дозволяє отримати значення температури води  $T_{\text{пл}}$ , температури поверхні плівки води  $T_{\text{пл}\delta}$ , температури повітря  $T_{\text{пов}}$ , вологовмісту повітря  $\rho$ , залежно від висоти скрубера  $x$ .

#### 4. Верифікація методики

Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних для скрубера з регулярною сітчастою насадкою наведено в таблиці 1.

Висота насадки 100 мм, еквівалентний діаметр 6,7 мм. Початкова температура повітря та вологовміст склали  $T_{\text{пов}1} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $\rho_1 = 0,01 \text{ кг/м}^3$  [5].

При розрахунках коефіцієнт тепловіддачі в плівці води вважається сталою величиною  $\alpha_{\text{пл}} = 20000 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ , що відповідає теплообміну при конденсації плівки.

Як показав аналіз даних в табл. 1, відхилення кінцевої температури води за експериментальними даними від розрахованої величини не перевищує 30 %. Проте, відхилення кінцевої температури повітря складає

200 %. Це призводить до значної похибки в розрахунку відносної вологості, яка визначається із залежності  $\varphi = \rho_2/\rho(T_{\text{пов}2})$ .

В цілому, модель коректно відображає якісну тенденцію зміни параметрів. Зокрема, зростання швидкості повітря за початкової температури води  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  призводить до зменшення температури води і практично не змінює температуру повітря.

#### Висновки

Аналіз отриманих результатів доводить, що існує невідповідність між експериментальними значеннями та результатами аналітичних розрахунків. Найбільшу похибку було отримано при розрахунку температури повітря за скруберам.

Проте, модель може використовуватися для якісної характеристики процесу тепло масообміну в скруберах. Зокрема, зростання швидкості повітря призводить до зменшення температури води, що підтверджується розрахунками.

Таким чином, якісно описуючи процес у скрубери, математична модель потребує вдосконалення для його кількісного описання.

Таблиця 1

Верифікація методики

$G_{\text{пл}}$ , кг/год	$G_{\text{пов}}$ , кг/год	$W$ , м/с	$T_{\text{пов}2}$ , $^\circ\text{C}$		$T_{\text{пл}}$ , $^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}1}$ , $^\circ\text{C}$		Відносна вологість, %		$\alpha_{\text{пов}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	$\beta$ , м <sup>2</sup> /с
			Досліди	Модель		Досліди	Модель	Досліди	Модель		
27,76	21,04	2,88	48,4	101,1	40,6	39,0	47,5	61,5	1,6	110,5	0,062
27,30	21,28	2,96	55,4	104,3	60,2	45,8	57,2	63,3	2	124,3	0,037
27,53	13,88	1,92	52,2	105,3	60,2	49,4	56,0	82,1	2	75,0	0,024
27,07	10,68	1,48	53,4	104,3	59,8	52,6	60,8	70,4	1,8	63,0	0,015
27,53	7,13	0,99	54,8	103,3	60,4	53,8	59,4	73,8	1,9	43,2	0,011
27,30	5,24	0,73	55,2	104,0	60,8	55,4	60,2	75	1,9	32,3	0,008
27,30	4,30	0,60	55,6	102,7	60,6	60,6	80,4	29,9	1,3	28,9	0,002
27,99	7,13	1,02	67,2	113,8	83,6	64,0	53,7	73,6	3,3	26,8	0,010
27,30	5,24	0,75	71,4	114,4	85,2	65,8	50,8	70	3,9	19,9	0,009
27,30	4,30	0,62	73,6	114,1	85,2	68,2	52,4	63,6	3,8	17,1	0,007

#### Література

1. M'barek Feddaoui Numerical study of the evaporative cooling of liquid film in laminar mixed convection tube flows [Текст] // M'barek Feddaoui, El Mustapha Belahmidi, Ahmed Mir, Abdelaziz Bendou – Int. J. Therm. Sci. (2001) 40, p. 1011–1020.
2. Георгаліна О. Р. Моделювання та оптимізація плівкових охолоджувачів [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.14 / О. Р. Георгаліна; [Одес. держ. акад. холоду] – О., 2004. – 20 с.
3. Гешев П. И. Тепломасообмен при контакте горячего газа со стекающей пленкой жидкости [Текст] // П. И. Гешев, О. П. Ковалев, О. Ю. Цвелодуб, Ю. В. Якубовский. – ИФЖ. – 1984. – Т. 46. – № 3. – С. 428–432.
4. Туз В. О. Тепломасообмін і гідродинаміка парогазорідних потоків в каналах з сітчастим покриттям [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.14.06 / В. О. Туз ; [Інститут технічної теплофізики НАН України]. – К., 2010. – 39 с.
5. Кузьменко І. М. Гідродинаміка та тепломасообмін в протитоковому контактному випаровувачі з сітчастою гофрованою насадкою [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.06 / І. М. Кузьменко ; [Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т»]. – К., 2003. – 17 с.