

хода регионального предприятия и региона в целом, исходя из ожидаемой динамики цен на готовую продукцию предприятия, стоимости модернизации каждой их технологий, контролируемой совокупностью такого же количества технологических коэффициентов матрицы А динамики отраслевого производства и текущей динамики налогообложения предприятия Центральными органами государства .

3.9 Моделювання впливу енергетичних параметрів контактного апарату

Актуальність. Ситуація в енергетиці країни на даний момент потребує економного використання вторинних енергоресурсів, що призводить до необхідності вивчення економайзерних процесів в цілому, та контактних апаратів зокрема. Окрім цього, використання контактних апаратів на економайзерній ділянці зменшує кількість шкідливих викидів та покращує екологічний стан навколишнього середовища.

Відомо⁵⁴, що процеси в контактних апаратах залежать від швидкостей води і повітря, площі контакту і вхідних температур компонент. На даний момент розглядається чотири типи моделей для розрахунку контактних апаратів та процесів в них. Однак, ці моделі потребують експериментального визначення коефіцієнтів переносу тепла та маси, а також існування аналогії Льюїса. Це обмежує їх застосування та впливає на точність температур і абсолютної вологості на виході. Виходячи з цього, актуальною є задача розробки контактних апаратів в цілому та вдосконалення математичної моделі їх розрахунку, зокрема.

Метою роботи є вдосконалення моделі контактного апарату, верифікація результатів моделювання за рахунок використання експериментальних даних та дослідження параметрів теплоносіїв на виході в процесі кондиціонування.

Виклад основного матеріалу. Математична модель розрахунку базується на рівняннях теплового балансу в апараті. Для моделювання контактного апарату приймемо, що вхідні температури і витрати води та повітря – задані, а геометричні параметри апарату – відомі. Всі теплофізичні властивості теплоносіїв визначаються за значеннями вхідних температур, що суттєво не впливає на результати розрахунків. Визначимо наступні величини.

54 American Journal of Energy Research, 2014, Vol. 2, No. 3, 47-52// Режим доступу , 47-52 <http://pubs.sciepub.com/ajer/2/3/1>

Значення коефіцієнта дифузії

$$D_{dif} = 0.216 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{273 + t_{\theta}}{273} \right)^{1.8}.$$

Швидкість повітря з рівняння нерозривності

$$W = \frac{G_{\theta}}{F \cdot \rho_{\theta}}, \quad F = \frac{\pi}{4} D^2.$$

Відоме рівняння тепловіддачі від повітря⁵⁵, доповнено коефіцієнтом 3.5, визначеним експериментально

$$Nu = 3.5 \cdot 0.67 Re_{\theta}^{0.5} Pr^{0.33}, \quad (3.20)$$

$Pr = 0.7$, $Re = \frac{WH}{\nu_{\theta}}$, $H = 0,1$ м – висота насадки, коефіцієнт тепловіддачі повітря $\alpha_{\theta} = \frac{Nu \lambda_{\theta}}{H}$.

Середньо інтегральне значення товщини граничного шару (витіснення)⁵⁶,

$$\delta = 0.375 \cdot 4.64 \sqrt{\frac{\nu_{\theta}(H/2)}{W}}, \text{ м}$$

Кількість випаруваної води з теплового балансу контактного апарату

$$Gp = \frac{1}{r} (G_{\theta} C_{\theta} (t_{1\theta} - t_{2\theta}) - Gg Cg (t_{1g} - t_{2g}) - Q_{\text{втр}}) \quad (3.21)$$

де t_g , t_{θ} – температура води і повітря, відповідно, 1 і 2 – на вході і виході.

⁵⁵ Исаченко В.П. и др. Теплопередача. Изд. 4-е перераб. и дополненное. - М.: «Энергоиздат», 1981. - 415 с.

⁵⁶ Теория пограничного слоя Автор: Шлихтинг Г.: Наука 1974 г., 712 с.

Абсолютна вологість на виході

$$d_2 = d_1 + \frac{Gp}{G\epsilon} . \quad (3.22)$$

Середня абсолютна вологість $d = 0.5(d_1 + d_2)$.

Визначаємо середній тиск пари в повітрі поблизу плівки води за середньою температурою плівки води, вважаючи, що повітря поблизу плівки – насичене $p = f(t)$. Тому з рівняння ідеального газу $p = \rho RT / \mu$ визначимо густину водяної пари поблизу плівки

$$\rho = p\mu / RT , \quad (3.23)$$

де $R = 8,3$ Дж/моль К – газова стала, $\mu = 18$ г/моль – мольна маса водяної пари.

Парціальний тиск пари в повітрі визначаємо через середнє значення абсолютної вологості $p = 101300 \frac{d}{0.622 + d}$.

Далі за рівнянням (3.23) знаходимо густину водяної пари в повітрі.

Визначаємо рівняння теплового балансу для повітря, прийнявши, що поблизу поверхні плівки температура повітря рівна температурі плівки води

$$G\epsilon C_{\text{в}}(t_{1\text{в}} - t_{2\text{в}}) = \alpha \epsilon \cdot f \left(\frac{t_{1\text{в}} + t_{2\text{в}}}{2} - \frac{t_{1\text{г}} + t_{2\text{г}}}{2} \right), \quad (3.24)$$

де f – площа контакту.

З теплового балансу апарату маємо, що тепло на випаровування = тепло від повітря + тепло від води, тобто

$$\rho \hat{a} \frac{D \text{dif}}{\delta} (\rho_{\text{г}} - \rho \hat{a}) r \cdot f = \alpha \hat{a} \cdot f \left(\frac{t_{1\hat{a}} + t_{2\hat{a}}}{2} - \frac{t_{1\text{г}} + t_{2\text{г}}}{2} \right) + G_{\text{г}} C_{\text{г}} (t_{1\text{г}} - t_{2\text{г}}). \quad (3.25)$$

Згідно рівнянь (3.24 – 3.25) ітераційно визначаємо невідомі температури води і повітря на виході $t_{2\text{г}}$. Ітерації завершуються, якщо різниця лівої та правої частин в (3.25) менше 1%. Абсолютну вологість на виході d_2 обраховуємо згідно рівняння (3.22), знаючи кількість випарованої води Gp згідно (3.21).

Верифікація моделі. Для верифікації моделі обрахуємо температури води та повітря на виході та порівняємо з відомими експериментальними даними⁵⁷. Верифікація проведена для контактного апарату з насадкою, висотою 0,1 м, еквівалентним діаметром 6,7 мм, змоченим периметром 1,44 м² за витрат води та повітря $Gg = 27.8$ кг/г, $Gv = 21$ м³/г. Температури води та повітря на вході = 60 °C та $t_{e1} = 120$ °C за абсолютної вологості повітря на вході $d1 = 10$ г/кг. Експериментально встановлені температури води та повітря на виході складають $tg2 = 55,6$ °C та $tâ2 = 45,6$ °C.

Систему двох рівнянь (3.24 – 3.25) з невідомими $tg2$ та t_{e2} розв'яжемо ітераційно (як описано вище), хід розв'язання наведено в таблиці 3.25. На першій ітерації за прийнятих значень температур (100 і 50 °C), кінцеві складають 59,5 і 135,3 °C. На наступній ітерації прийняте значення уточнюється як середнє арифметичне між прийнятим та обрахованим $80 \approx 0,5(100+59,5)$, $92 \approx 0,5(50+135,3)$ і обрахунок повторюється. Похибка ітерації обраховується з різниці лівої і правої частин рівняння (3.25).

Таблиця 3.2

Результати обрахунку

Прийнято/ отримано, № ітер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15
$tâ2$, °C	100/ 59,5	80/ 33	56/ 34	45/ 54	50/ 67	58/ 69	63/ 67	65/ 63	64/ 61	62,5/ 60	61/ 60,5	61,6/ 61,63
$tg2$, °C	50/ 135,3	92/ 91	91/ 37	64/ 12	38/ 24	31/ 41,5	36/ 52,6	44/ 57	50/ 55	52,5/ 51,5	51/ 48	48,6/ 49,5
δ , %	4	125	129	92	228	843	298	66	78	29	18	0,9

Як видно з таблиці 3.2, на 15 ітерації результати розрахунку сходяться з точністю до 1%. Ітерації 12-14 в таблиці 3.2 не показані.

Для останньої 15 ітерації обраховано абсолютну вологість повітря на виході $d2 = 66$ г/кг і швидкість повітря $W = 3,26$ м/с.

57 American Journal of Energy Research, 2014, Vol. 2, No. 3, 47-52// Режим доступу, 47-52 <http://pubs.sciepub.com/ajer/2/3/1>

Відхилення обрахованих результатів від експериментальних ($tg2 = 55,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t2в = 45,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) для води і повітря складає 11% та 35,2%.

За описаною методикою верифікуємо модель через експериментальні значення, що наведені в таблиці 3.3. Окрім експериментальних значень температур води $tg2$ і повітря $tв2$ та абсолютної вологості $d2$ на виході в таблиці 3.3 показано розраховані значення та відхилення розрахованих значень від експериментальних.

Таблиця 3.3

Верифікація моделі розрахунку

N п/п	$tв1$, °C	$tg1$, °C	Gg , кг/год	$Gв$, кг/год	$tg2$, °C, експ./ розн.	$tв2$, °C, експ./ розн.	$d2$, г/кг експ./ розн.	W , м/с, експ./ розн.	Відхилення, %			
									$tg2$	$tв2$	$d2$	W
1	120	60	27,8	21	45,6/49,5	55,6/61,63	75/ 67	2,93/3,26	8	10	12	10
2	120,8	59	27,88	13,88	49,6/50,27	53,8/54,77	75/ 75	1,93/2,16	1	2	0	11
3	120,6	59,8	27,07	10,68	52,6/51,3	53,4/51,3	74/ 84	1,48/1,66	3	4	12	11
4	119,4	60,2	27,76	7,13	53,8/52,9	54,6/45,7	83/ 98	0,99/1,11	2	20	15	11
5	120,6	60,8	27,3	5,24	55,2/54,2	55/ 42,2	89/ 112	0,73/0,82	2	30	21	11
6	0,6	40,2	27,53	10,54	40,4/42,25	46,2/ 36,04	43/ 44	1,44/1,64	4	28	2	12

Як видно з даних таблиці, це відхилення для температури води на виході є найменше і складає 1-8%. Дещо вищим (проте допустимим) є відхилення для швидкості повітря в контактному апараті 10-12%. Однак, відхилення для розрахованої абсолютної вологості повітря на виході складає до 21 %, а для температури повітря на виході – до 30%. Ці, досить високі значення, пов'язані з введеним емпіричним коефіцієнтом 3,5 в рівнянні (3.20), оскільки не враховано, що коефіцієнт є залежним від швидкості повітря.

Розглянемо за наведеною моделлю розрахунок процесу контактного охолодження і зволоження повітря в системах кондиціонування, що відбувається за рахунок різниці температур ($t_0 - t_3$) і парціальних тисків ($p_3 - p_0$) потоків. Процес характеризується значним температурним градієнтом і протікає за температури води, вищої температури точки роси, але нижчої температури мокрого термометра $t_p < t_3 < t_m$ на h_d -діаграмі.

Промодельємо роботу контактного апарату в режимі кондиціонування за вищенаведеною моделлю та порівняємо отримані результати з експериментальними, що складають $Gg = 30.8$ кг/г, $Gv = 30.8$ кг/г, $t_0 = 155$ °C, $t_{g1} = 38$ °C, $d1 = 10$ г/кг за тих же геометричних розмірів.

На рисунках 3.26 та 3.27 показано результати моделювання. На рисунку 3.26 показано залежність температур води та повітря на виході t_{g1} , t_{g2} (верхня та нижня криві) від швидкості повітря W .

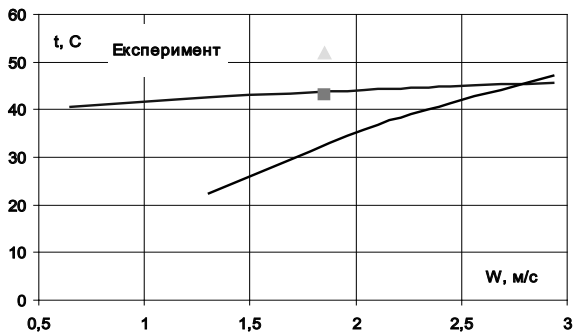


Рис. 3.26. Залежність температур води і повітря на виході від швидкості повітря (точки – експеримент; нижня лінія і верхня точка – температура повітря на виході t_{g2})

Як видно з рисунку 3.26, температура води на виході t_{g2} практично не залежить від швидкості повітря в апараті. Оскільки моделювання проведено за умов, що відповідають експериментальним, оцінене відхилення розрахованої та експериментальної температури води на виході складає близько 2%.

Нижня крива на рис. 3.26, отримана шляхом моделювання, вказує на зростання температури води на виході з ростом швидкості t_{g2} (оскільки зі зростанням швидкості росте витрата повітря). Розрахована крива для t_{g2} відхиляється від експериментальної точки на 56%.

На рисунку 3.27 показано модельну криву залежності абсолютної вологості повітря на виході від швидкості повітря W .

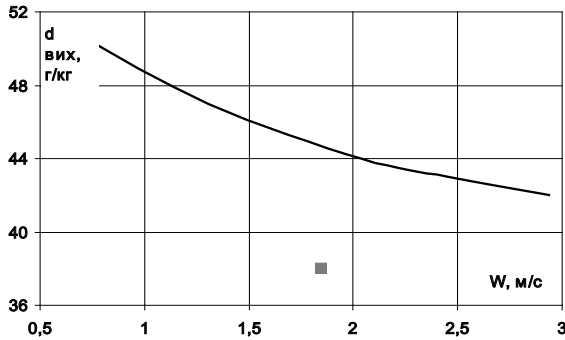


Рис. 3.27. Залежність абсолютної вологості повітря на виході від швидкості повітря (точка – експеримент).

На даному рисунку видно, що абсолютна вологість повітря зменшується з ростом його швидкості, оскільки при цьому зростає витрата повітря. Відхилення розрахованих даних від експериментальної точки складає 18%.

Висновки. Рівняння тепловіддачі від повітря (3.20) доповнено емпірично визначеним коефіцієнтом 3.5, що визначений експериментально та взятий як осереднене значення з діапазону 2...4 при зміні швидкості повітря від 0,6 м/с до 3 м/с. Запропонована модель дозволяє обрахувати кінцеві параметри води та повітря за тепло- та масообміну в усіх режимах роботи контактного апарату.

Найвища похибка в моделі складає 35% для температури повітря на виході, що пояснюється залежністю вищевказаного емпіричного коефіцієнту від швидкості повітря. Також модель дозволяє якісно оцінити параметри теплоносіїв на виході з контактного апарату та визначити взаємозв'язки між водою та повітрям за тепломасообміну в контактному апараті.