

ТЕПЛОМАСООБМІН ЗА АДІАБАТНОГО ЗВОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯ В СІТЧАСТОМУ КАНАЛІ

1. Експериментальне вивчення тепломасообміну

Вивченню контактного випаровування присвячено цілий ряд робіт [1-10]. Зокрема, в роботах Дорошенка [4-6], Харіна [9-10] встановлено, що застосування сітчастих чи пористих матеріалів інтенсифікує процеси тепломасообміну (ТМО), тому наші дослідження проводяться на елементі насадки, виготовленому з сітки. Саме сітчаста насадка має розвинуту питому поверхню контакту та відрізняється технологічністю виготовлення, проте відомі результати досліджень ТМО не можуть бути поширені на нову насадку без експериментальної перевірки. Тому в даній роботі досліджено процеси тепломасообміну за адіабатного зволоження повітря, що дозволяє мінімізувати температуру води на виході, та створено методику розрахунку контактного зволожувача.

Дослідження проведено на моделі каналу сітчастої гофрованої насадки висотою 1 м, утвореного між двома трубами, типу труба в трубі. На зовнішній поверхні меншої труби (діаметром 16 мм) методом контактного зварювання закріплювалась сітка з розміром вічка 0,56 мм. В процесі роботи водня плівка, яка формувалася зрошувачем переливного типу, опускалася по трубі з сіткою назустріч повітряному потоку. Еквівалентний діаметр каналу складав $d_e=10,5$ мм. Температури

теплоносіїв вимірювалися термомпарами безпосередньо на вході та виході з експериментальної ділянки, що дало змогу відмовитися від врахування впливу кінцевих ефектів. Дослідження проведено за постійної густини зрошення каналу $\Gamma=5,76$ г/(мс) і початкового вологовмісту повітря $d_1=10$ г/кг. Процес в моделі каналу протікав за сталої температури води, яка варіювалася залежно від початкової температури повітря, тобто вивчався ТМО за адіабатного зволоження повітря.

Результати експериментальних досліджень показано на рисунках 1-3. З рис. 1 видно, що перехід в діапазон більш високої початкової температури повітря призводить до зростання температурного напору в апараті.

Внаслідок цього зростає кількість теплоти, відданої повітрям на випаровування плівки води, що обумовлює збільшення кінцевого вологовмісту повітря d_2 .

Разом з цим, як видно з рис. 2, зростання швидкості повітря призводить до зростання коефіцієнта теплообміну, оскільки збільшуються рушійні сили процесів тепломасообміну. Відзначимо, що наведені в роботі α розраховано на різницю середніх температур теплоносіїв, яка є рушійною силою в контактних апаратах.

Узагальнення дослідних даних проведено в безрозмірному вигляді на основі наведеного в літературі [1, 7] комплексу чисел подібності

$$Nu = f(Re_{\text{пов}}, Pr),$$

де Nu , $Re_{\text{пов}}$, Pr – числа подібності Нусельта, Рейнольдса для повітря та Прантля.

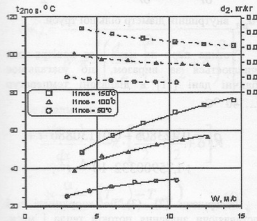
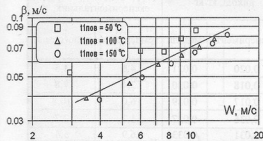


Рис. 1. Залежність кінцевої температури та кінцевого вологовмісту (штрихова лінія) повітря від його швидкості за перемінних початкових температур

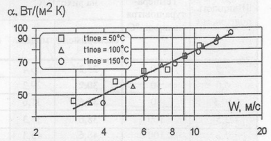
З рис. 3, де приведено результати досліджень в узагальнюючому вигляді, видно, що максимальне відносне відхилення дослідних точок від узагальнюючої прямої складає 13%. Тобто, для сітчастого каналу висотою $H=1$ м і еквівалентним діаметром 10 мм залежність для визначення коефіцієнта теплообміну матиме вигляд:

$$Nu = 0.32 Re_{\text{пов}}^{0.51} Pr^{0.33} \quad (1)$$

Узагальнююча залежність справедлива в діапазоні $Re_{\text{пов}} = 1770 \dots 7740$.



а)



б)

Рис. 2. Залежність коефіцієнтів тепло- (а) та масообміну (б) від швидкості повітря

Концентраційний коефіцієнт масообміну при адиабатному випаровуванні води можна визначати з аналогії Люїса.

З рис. 3 видно, що дані Бермана [1], отримані при збіганні плівки води по внутрішній поверхні вертикальних каналів круглого та прямокутного перерізу при розвинутому гідродинамічно стабілізованому турбулентному русі зустрічного потоку повітря ($Re_{\text{пов}} > 5 \dots 13\,000$, $H/d \geq 50$), лежать нижче на 25-30% ніж результати, отримані при збіганні плівки по сітчастій поверхні. Це пояснюється інтенсифікацією процесів при русі плівки по трубі з сіткою.

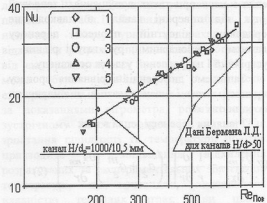


Рис. 3. Узагальнення даних по теплообміну в каналі з сіткою: 1-5 - початкова температура повітря відповідно 50, 80, 100, 120, 150 °C

2. Моделювання тепломасообміну в сітчастому каналі насадки

Спростивши модель Гешева-Якубовського [3], що описує тепломасообмін в протитоковому насадковому апараті, отримуємо модель тепломасообміну при адиабатному збіганні

плівки в одиночному каналі з сітчастою поверхнею. Рідина з температурою $T_{води}^{ex}$, стікаючи по стінках каналу висотою L зі швидкістю U , випаровується за рахунок передачі тепла від потоку повітря, що надходить із

температурою T_{nos}^{ex} і швидкістю W у нижню частину каналу. Температура плівки не змінюється, оскільки вона відповідає температурі мокрого термометра, а повітря охолоджується до

T_{nos}^{eux} . При контакті газу і плівки рідини відбуваються процеси конвективного переносу тепла в газовій фазі і дифузії пари в газ. Сформулюємо диференційні рівняння переносу тепла і маси при таких допущеннях: тепловий потік від поверхні каналу в навколишнє середовище відсутній; процеси переносу вважаємо стаціонарними; рух газу і рідини – зустрічний і направлений уздовж осі каналу.

Запишемо диференційні рівняння процесу переносу тепла і маси в газі в циліндричних координатах $x-r$.

Рівняння переносу тепла в газі:

$$W \frac{\partial T_{nos}}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(a_2 + a_2^m \right) \frac{\partial T_{nos}}{\partial r} \right] \quad (2)$$

Рівняння переносу маси в газі:

$$W \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(D + D^m \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} \right], \quad (3)$$

де індекс "m" ставиться біля коефіцієнтів турбулентного переносу.

Ці рівняння вирішуються при таких початкових умовах:

$$\frac{\partial T_{nos}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = \frac{d_{ст}}{2},$$

де $d_{ст}$ внутрішній діаметр більшої труби.

Густина пари на межі фаз повітря-вода обчислюється за виразом, що узагальнює табличні дані [11] в діапазоні температур 10...140 °C:

$$\rho_n = 0,223805 - 0,01130886 \cdot t + 1,75900332 \cdot 10^{-4} \cdot t^2.$$

Інтегруючи (2), (3) по координаті r і підставляючи значення потоків тепла і маси, виражені через коефіцієнти тепломасообміну:

$$\langle W \rangle \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d \langle T_{nos} \rangle}{dx} \cdot \left(\frac{d_{ст}}{2} - \left(\frac{d}{2} + \delta \right) \right) = -\alpha \cdot \left(\langle T_{nos} \rangle - T_{води} \right)$$

$$\langle W \rangle \cdot \frac{d \langle \rho \rangle}{dx} \cdot \left[\frac{d_{ст}}{2} - \left(\frac{d}{2} + \delta \right) \right] = \beta \cdot \left(\rho_\delta - \langle \rho \rangle \right),$$

Таблиця 1

Порівняння результатів експериментального та математичного моделювання

Швидкість повітря, м/с	Температура повітря на вході, °C	Температура повітря на виході, °C		Вологовміст повітря на виході, кг/кг		Відхилення результатів розрахунку по моделі від експериментальних, %	
		експеримент	модель	експеримент	модель	температура	вологівміст
2,9	50	25,2	26,4	0,020	0,021	4,6	3,5
6,0	50	30,2	29,2	0,018	0,020	3,4	7,8
10,5	50	33,6	31,6	0,017	0,019	6,0	10,8
3,5	100	38,6	39,3	0,036	0,037	1,7	2,7
7,2	100	48,6	45,3	0,031	0,033	6,9	5,4
12,7	100	56,4	50,6	0,028	0,031	10,2	8,7
4,0	150	48,4	45,3	0,053	0,051	6,3	3,7
8,2	150	64	53,6	0,046	0,045	16,2	1,6
14,5	150	75,6	61,2	0,041	0,042	19,1	0,8

де індекс < > характеризує середні значення величин вздовж координати r , d - зовнішній діаметр меншої труби, d - товщина плівки. Якщо швидкість визначити з рівняння нерозривності

$$\langle W \rangle = \frac{G}{\rho \cdot \pi \cdot \left[\left(\frac{d_{\text{вн}}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} + \delta \right)^2 \right]}$$

то отримаємо:

$$\frac{d\langle T_{\text{нов}} \rangle}{dx} = -\pi \cdot \left[\frac{d_{\text{вн}}}{2} + \frac{d}{2} + \delta \right] \times \frac{\alpha_z}{G \cdot c} \cdot (\langle T_{\text{нов}} \rangle - T_{\text{води}}) \quad (4)$$

$$\frac{d\langle \rho \rangle}{dx} = \pi \cdot \left[\frac{d_{\text{вн}}}{2} + \frac{d}{2} + \delta \right] \times \frac{\rho \cdot \beta}{G_z} \cdot (\delta - \langle \rho \rangle) \quad (5)$$

Тобто, задача зводиться до рішення нормальних рівнянь (4), (5) із початковими

умовами: $T_{\text{нов}}^{\text{вх}} = T_{\text{нов}}^{\text{вх}}$; $\rho = \rho^{\text{вх}}$ при $x=0$. Ці рівняння приводяться до виду диференціальних рівнянь з розділними змінними, які мають аналітичний розв'язок.

Таким чином, визначення кінцевих температури і вологовмісту повітря за умови адіабатного зволоження повітря проводимо за рівняннями:

$$T_{\text{нов}}^{\text{вих}} = T_{\text{води}}^{\text{вх}} + (T_{\text{нов}}^{\text{вх}} - T_{\text{води}}^{\text{вх}}) \times \exp \left[\frac{-\pi \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}}{2} + \frac{d}{2} + \delta \right) \cdot L \cdot \alpha}{G_{\text{нов}} \cdot \rho} \right]$$

$$\rho^{\text{вих}} = \rho_{\delta} + (\rho^{\text{вх}} - \rho_{\delta}) \times$$

$$\times \exp \left[\frac{-\pi \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}}{2} + \frac{d}{2} + \delta \right) \cdot \beta \cdot L \cdot \rho}{G_{\text{нов}}} \right]$$

де α, β - коефіцієнти тепло- та масообміну в каналі з сітчастими стінками, які розраховано за рівнянням (1) та аналогією Люїса відповідно.

Тестування вищевикладеної математичної моделі виконано шляхом порівняння розрахованих та експериментальних кінцевих температури та вологовмісту повітря за одиноким каналом висотою 1 м та еквівалентним діаметром 10,5 мм. Результати тестування моделі показано в табл.1. Як видно з таблиці, при незначних температурних напорах відносно відхилення розрахованих значень вологовмісту від експериментальних зростає до 10,8%, що може бути пов'язано зі складністю експериментального визначення цього параметру за показаннями гігрометра, розміщеного в зустрічному потоці повітря. В той же час зростання швидкості та температури повітря призводить до збільшення відхилення розрахованих та експериментальних значень по температурі, що, очевидно, пояснюється наявністю теплових втрат. При цьому максимальне значення відхилення не перевищує 20%, що вказує на можливість застосування даної моделі для спрощеного розрахунку процесів випаровування в контактних апаратах.

Результати математичного моделювання наведені на рис. 4-6.

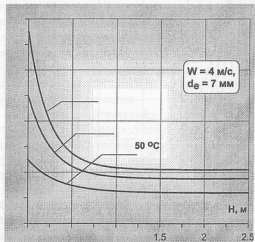


Рис. 4. Вплив температури повітря на вході в канал та його висоти на температуру повітря на виході

З рис. 4 видно, що в діапазоні початкових температур повітря 50-150°C на відстані 0,3 м від входу практично вдвічі зменшується температура повітряного потоку. А повної стабілізації температури повітря на виході вдається досягти на відстані близько 1,2 м.

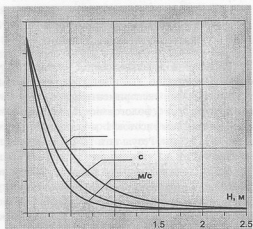


Рис. 5. Вплив швидкості повітря та висоти каналу на температуру повітря на виході

Як видно з рис. 5, зменшення швидкості повітря з 15 до 4 м/с призводить до скорочення ділянки стабілізації температури з 2 до 0,9 м, тоді як двократно зниження температури спостерігається на відстані від 0,25 до 0,65 м при зростанні швидкості повітря від 4 до 15 м/с.

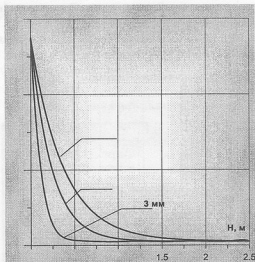


Рис. 6. Вплив еквівалентного діаметра каналу та його висоти на температуру повітря на виході

З рис. 6 видно, що за еквівалентного діаметра каналу до 3 мм повна стабілізація кінцевої температури повітря спостерігається

вже на відстані 0,4 м, в той час, як за діаметра 11 мм така стабілізація буде через 1,7 м.

Висновки

Зі зниженням швидкості повітря W його температура наближається до температури води, а вологовміст повітря зростає.

Зростання швидкості повітря призводить до зростання коефіцієнтів тепло- масообміну, оскільки збільшуються руйнівні сили процесів.

За рахунок збігання плівки по трубі з сіткою на 25-30% підвищується ефективність процесів ТМО в порівнянні зі збіганням плівки по гладкій поверхні вертикальних каналів.

На відстані 0,3 м від входу, незалежно від його температури на вході, практично вдвічі зменшується температура повітряного потоку. Повна стабілізація температури на виході досягається через 1,2 м.

Зменшення швидкості повітря з 15 до 4 м/с призводить до скорочення ділянки стабілізації температури з 2 до 0,9 м, тоді як двократно зниження температури спостерігається на відстані від 0,25 до 0,65 м при зростанні швидкості повітря від 4 до 15 м/с.

За еквівалентного діаметра каналу 3 мм температура стабілізується вже на відстані 0,4 м, тоді як за діаметра 11 мм така стабілізація буде через 1,7 м.

Література

1. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. - М. - Л.: ГЭИ, 1957. - 424 с.
2. Берман Л.Д. О справедливости аналогии между тепло- и массообменом и соотношения Льюиса для кондиционеров и градирен// Холодильная техника. - 1974. - N2. - С. 34 - 37.
3. Гешев П.И., Ковалев О.П., Цвелодуб О.Ю., Якубовский Ю.В. Тепломассообмен при контакте горячего газа со стекающей пленкой жидкости // ИФЖ.-1984. - т. 46. - № 3. - С. 428-432.
4. Дорошенко А.В., Липа А.И. Испарительное охлаждение воды в аппаратах с плотными насадочными слоями// Холодильная техника.- 1981. - № 3. - С. 24 - 29.
5. Дорошенко А.В., Сикорская Е.М., Липа А.И. Тепломассообменные противо- и поперечноточные насадочные аппараты для холодильной техники// Холодильная техника.- 1984. - № 12. - С. 36 - 41.
6. Дорошенко А.В., Липа А.И. Испарительное охлаждение воды в аппаратах с плотными насадочными слоями// Холодильная техника. - 1981. - № 3. - С. 24-29.

7. Жаворонков Н. М. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах. - М.: Советская наука, 1944. - 224с.
8. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Ректификация термически нестойких продуктов - М.: Химия, 1972. - 200 с.
9. Харин В.Ф. Гидродинамические закономерности и массообмен при пленочном течении жидкости по шероховатой поверхности. Автореф. к.т.н. - Казань, КХТИ, 1972, 27 с.
10. Харин В.Ф., Булкин В.А., Николаев Н.А. Интенсификация процесса массопереноса в жидкой фазе в аппаратах прямоточного типа. - Изв. Вузов СССР. Химия и хим. технология, 1971, т. 14, вып. 11, с. 1739-1741.
11. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара - М.: Энергия, 1975. - 78 с.