

УДК 621.565.001.63

Подмазко О.С.
НУ «ОМА»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАСАДОК УПОРЯДКОВАНОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ СУДНОВИХ АПАРАТІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯ

Актуальність теми.

Аналіз проблеми дозволяє зробити висновок про безперечну необхідність проведення процесу зволоження повітря, для здійснення якого потрібне подальше удосконалення апаратного забезпечення, у рамках задач, які направлені на рішення питань “Indoor Air Quality” IAQ, та енергозбереження. При цьому слід зазначити, що протягом 20 років до 2004 р. спостерігалася майже повна відмова від зволожувачів повітря у скандинавських країнах, а в інших перевага надавалась на застосування парових зволожувачів, у зв’язку із антибактеріальними властивостями гарячого пару при $t \geq 100^{\circ}\text{C}$, не дивлячись на значні енергозатрати на організацію процесу. Іншим пристроям зволоження, у т.ч. плівковим насадковим апаратам випарного типу, які характеризуються натуральним природним процесом та найкращими енергетичними показниками, приділялось недостатньо уваги. Цей напрямок потребує нових фундаментальних та прикладних досліджень.

Метою дослідження є розробка ефективних зволожувальних пристроїв на базі нових типів регулярних насадок (РН) стосовно до суднових систем кондиціонування повітря.

Таблиця 1. Геометричні характеристики досліджених РН.

№ РН	Матеріал	d_c , мм	$F_{к.п.}$, м^2	π_c	$f_{к.п.}$, $\text{м}^2/\text{м}^3$
I	Міпласт	6,9	20,01	0,654	381
II		17,0	9,13	0,745	174
III	ПЕТ	6,0	29,4	0,243	560
IV	GLASdek 3	6,5	28,51	0,521	543
V	ПВХ	15,5	7,25	0,465	138
VI		18	4,78	0,465	91

Метод аналізу політропічних процесів зволоження повітря в щільних насадкових шарах РН при поперечноточної схеми контактування потоків, який є модифікованим варіантом рішення Учїда (Uchida H., Japan) у цілому для модуля та Мікклї (Mickley H.S., Massachusetts Institute of Technology, USA) для елементарної комірки, з урахуванням його розвитку в науковій групї проф. О.В. Дорошенка (ОТІХП).

Метод базується на наступних основних допущеннях: поперечноточний модуль зволожувача розбивається на ряд елементарних умовно протиточні $m \times n$ комірки, рис.1; інтенсивність процесів переносу для конкретних робочих умов в площинї насадки не змінюється: $N_{\Sigma} (kh) = \text{const}$, $\alpha\beta/h = \text{const}$; розподїл потоків в об'ємі модуля рівномірне, коефіцієнт зрошування $m_i = G_{ж} / G_{г} = \text{idem}$; зміна витрати $G_{ж}$ в процесї випарення не враховується; співвідношення Л'юїса $Le = 1$; величини поверхні переносу теплоти і маси однакові та дорівнюють геометричній поверхні РН: $F_t = F_m = F$.

Процес зволоження повітря в контактних апаратах описується рівняннями теплового балансу та тепловіддачі у відповідних фазах (1, 2):

$$\begin{aligned} dQ_{\Sigma,i} &= \frac{c_{ж} G_{ж}}{m} dt_{ж,i} \\ dQ_{\Sigma,i} &= \alpha_{ж} (t_{ж} - t^*)_i dF_i, \\ \rightarrow N_{ж} &= \alpha_{ж} \frac{G_{ж} G_{г}}{m F} = \int dt_{ж,i} / (t_{ж} - t^*)_i; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dQ_{\Sigma,i} &= -\frac{G_{г}}{n} dh_i \\ dQ_{\Sigma,i} &= \beta_h (h^* - h)_i dF_i, \\ \rightarrow N_{г} &= \frac{\beta_h G_{г}}{n F} = \int dh_i / (h^* - h)_i; \end{aligned} \quad (2)$$

а також рівнянням кінетики сумарного переносу теплоти (3):

$$\begin{aligned} dQ_{\Sigma,i} &= k_h (h'' - h)_i dF_i, \\ \rightarrow N_{\Sigma} &= \frac{k_h G_{г}}{n F} = \int dh_i / (h'' - h)_i, \end{aligned} \quad (3)$$

де $G_{г}$, $G_{ж}$ – витрати повітря і води в модулі, кг/с; $c_{ж}$ – теплоємність води, кДж/(кг·К); $t_{ж}$, t^* – температура води та поверхні розділу, оС; h'' , h^* – ентальпія насиченого повітря при $t_{ж}$ и t^* ,

відповідно, кДж/кг; F – площа поверхні контакту фаз, м²; α_j – коефіцієнт тепловіддачі у рідинній фазі, кВт/м²·К; β_h , K_h – приватний та загальний коефіцієнт переносу у газовій фазі, кг/(м²·с); N_g , N_j , N_Σ – числа одиниць переносу у газовій, рідинній фазах та сумарне, відповідно; i – номер комірки; m , n – числа розбиття модуля (число комірок) у напрямку руху потоків води та повітря.

Числа одиниць переносу (NTU) N_g , N_j , N_Σ , які визначають інтенсивність процесу тепломасопереносу, є розрахунковими величинами.

Метод аналізу ілюструється рис.1 та складається із встановлення рушійних сил процесу у контактуючих фазах, що в умовах поперечноточного модуля потребує проведення певних ітераційних процедур.

На першому етапі, допускається рівність $t^* = t_j$, і задаючись перепадом температур води $\Delta t_{j,i}$ в комірці 1.1, для якої відомі параметри потоків на вході, визначається число $N_{\Sigma,i}$ (4).

$$N_{\Sigma,i} = \frac{z \cdot a \cdot \Delta t_{j,i}}{(h_{вх}^n - h_{вх}^n)_{i+1} + (h_{вих}^n - h_{вих}^n - c \cdot \Delta t_{j,i})_i} \quad (4)$$

де $a = m_i$ Сж; $вх$, $вих$ – позначення параметрів, які відносяться до входу та виходу комірки, наприклад, $h_{вих}^n$ – ентальпія насиченого повітря при температурі води на вході в комірку.

Виходячи із умови $N_{\Sigma,i} = \text{const}$ обчислюються значення температури води на виході кожної комірки $t_{j,вих,i}$, при цьому правильність завдання числа $N_{\Sigma,i}$ встановлюється відповідністю середньої розрахункової величини $t_{j,вих}$ в цілому для модуля його експериментальному значенню.

Графічні побудови в t, h - діаграмі за даною процедурою складаються з знаходження положення робочих ліній процесу в комірках $h_i = f(t_{j,i})$, які мають нахил α ($\text{tg } \alpha = c$, для комірки 1.1 – CD, рис.1), – за допомогою ліній, які проводяться під кутом β , $\text{tg } \beta = \pi$ (5), для комірки 1.1 – AB, рис.1.

$$\alpha_{ж}/\beta_h = (h^* - h)_i / (t_{ж} - t^*)_i \quad (6)$$

$$dh_i/dt_{\tau,i} = (h^* - h)_i / (t_{\tau} - t^*)_i \quad (7)$$

Для аналізу експериментальних даних, які отримані в умовах проведення адіабатичного процесу, використовувався класичний метод Мак-Адамса.

У якості експериментальних зразків РН були використані сучасні насадки із полімерних матеріалів, а саме: міпласт та ПЕТ (Україна), GLASdek3 (Швеція), ПВХ (Нідерланди).

Було проведено експериментальне дослідження часового циклу зрошування насадки. На рис.2 представлено графік часу випаровування води з поверхні насадки τ в залежності від швидкості повітря w в живому перетині РН. Початковий час експозиції зрошування насадки 5 хв, що гарантує повне зрошування всієї поверхні.

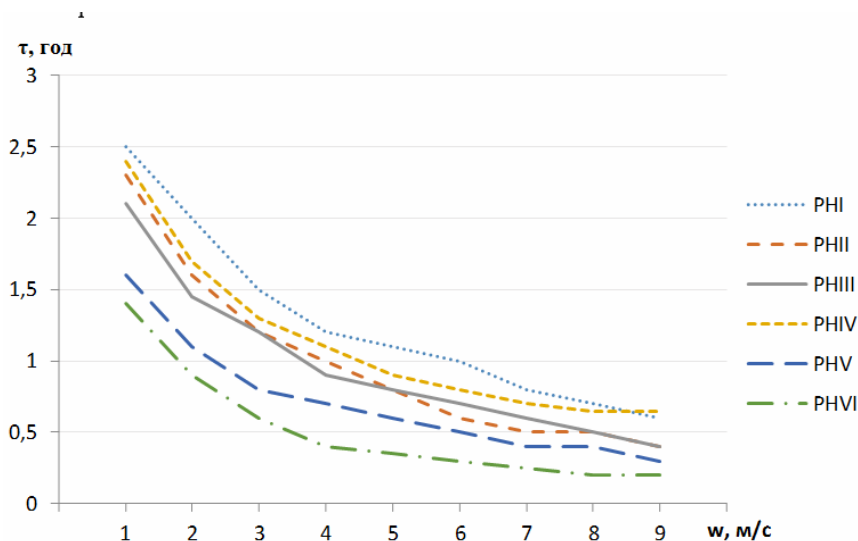


Рис.2. Залежність часу випаровування води τ з поверхні насадки від швидкості потоку повітря в живому перетині насадки w .

На рис.3 показана експериментальна залежність зміни температури плівки води t_w у часі при різних значеннях витрати повітря G_v . В процесі роботи зволожуючого пристрою після зрошування насадки температура плівки води зменшується разом із випаровуванням води до певного моменту часу, який виначає повне випаровування плівки, що фіксується ростом температури – показаннями термопар, що розміщені на робочій поверхні РН. Екстремум t пояснюється суттєвим зменшенням рідинного шару аж до «оголення» термопар.

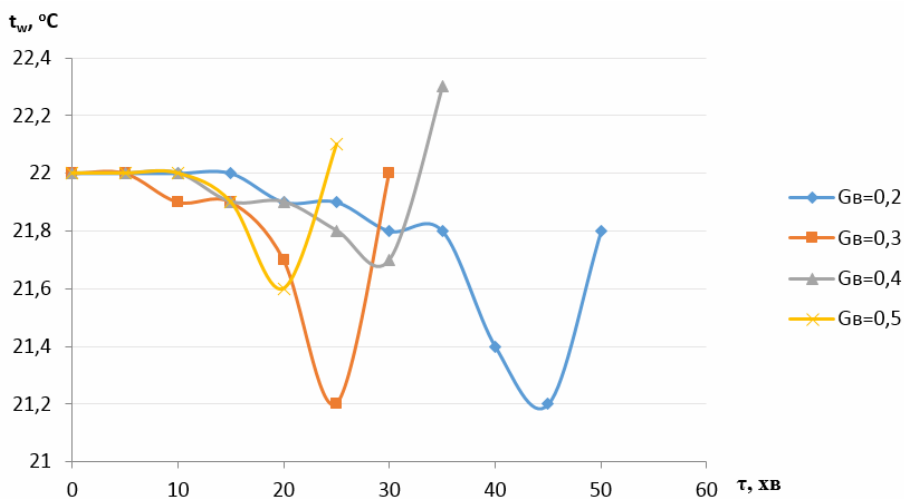


Рис.3. Зміна температури поверхні води t_w протягом часу t при різних масових витратах повітря G_v .

При аналізі характеристик поперечноточних насадок вагоме значення представляє інформація про розподіл газового та рідинного потоків у насадковому шарі, оскільки рівномірне зрошування верхнього шару РН не гарантує незмінності витрати рідини в кожному із каналів насадки. Результати дослідження цього питання відображені на рис.4, 5.

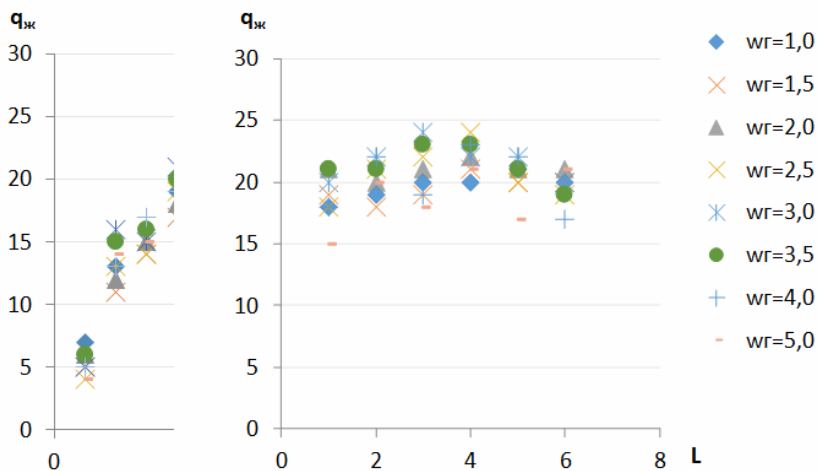


Рис.4. Розподіл питомої витрати води $q_{ж}$ за діною насадки L : ліворуч для РНІІ, РНV, РНVI і праворуч для РНІ, РНІІІ, РНIV, при відповідних швидкостях повітряного потоку $w_{Г}$.

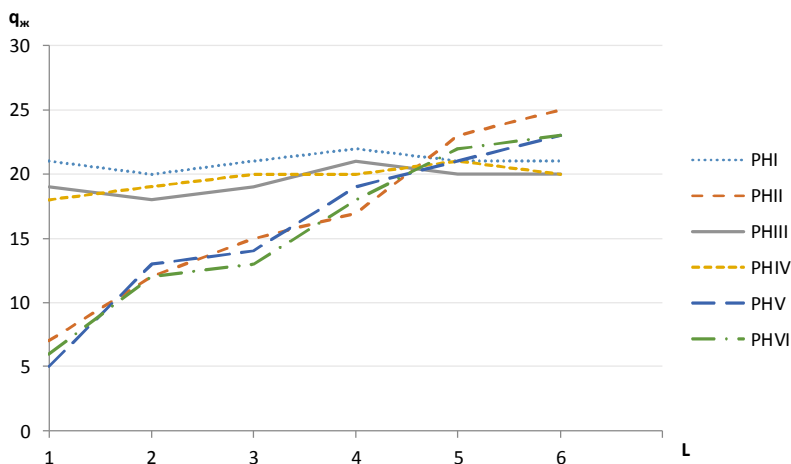


Рис.5. Розподіл питомої витрати води $q_{ж}$ за довжиною насадки L .

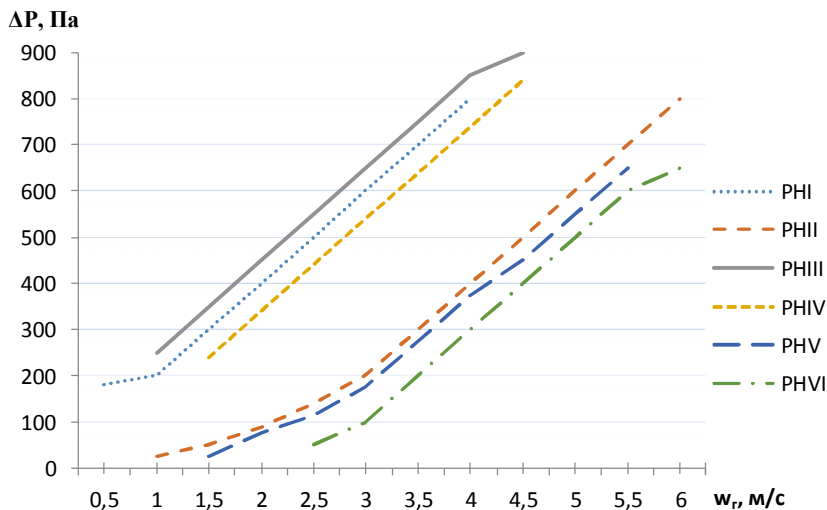


Рис.6. Залежність гідравлічного опору ΔP насадок від швидкості повітряного потоку w_G .

В результаті проведеного дослідження можна сформулювати наступні висновки:

вки:

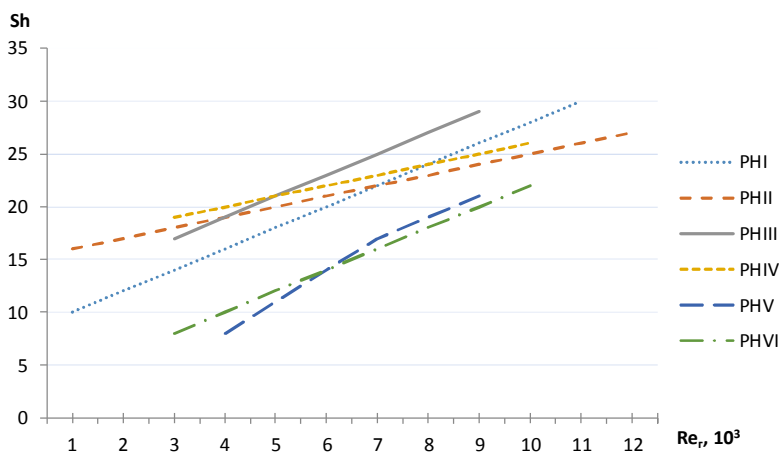
- В насадках PHI, PHIII, PHIV забезпечується майже рівномірний розподіл рідини.
- Насадки PHII, PHV, PHVI характеризуються суттєвим віднесенням рідини.

Отримані емпіричні кінетичні залежності:

$$Sh = c \cdot Re_{\Gamma}^n \cdot Re_{\text{ж}}^m \quad (8)$$

Таблиця 2. Значення параметрів кінетичної залежності $Sh=f(Re_{\Gamma}, Re_{ж})$.

Тип РН	c	n	m	Re_{Γ}	$Re_{ж}$	$\delta_{cp}, \%$
PHI	12,4	0,42	0,28	1500...6000	42...180	6,3
PHII	165,4	0,34	0,37	1000...10000	55...300	4,9
PHIII	154,2	0,38	0,4	1000...10000	60...280	4,6
PHIV	144,1	0,36	0,36	1000...10000	50...300	4,0
PHV	8,6	0,65	0,24	1300...6500	55...170	5,9
PHVI	11,2	0,72	0,3	2000...8000	60...170	6,4

Рис.7. Залежність чисел Sh від чисел Re газового потоку для досліджуваних насадок при $Re_{ж} = 150$.

Кінетичні характеристики досліджуваних РН розглядалися із урахуванням енерговитрат на здійснення процесу. Використовувалася методика, яка запропонована в роботі Колева Н.:

$$E^* = \left(\frac{1}{N_{\Sigma}} \right) \cdot \left[\Delta P + \frac{H \cdot G_{ж} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot g}{G_{\Gamma}} \right] \quad (9)$$

де E^* - питома витрата енергії, яка складається із сумарної роботи вентилятора і насоса, віднесеної до одного кубічного метру повітря і висоті насадки, яка відповідає одній одиниці переносу, Дж/м³.

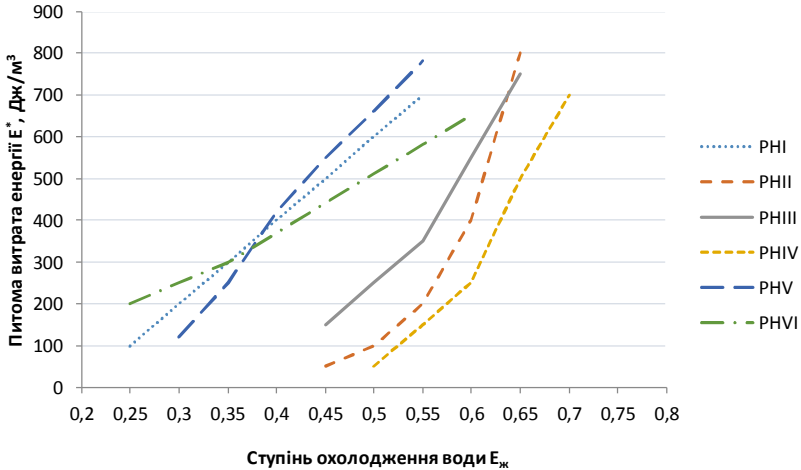


Рис.8. Залежність питомої витрати енергії E^* від $E_{ж}$ при $q_{ж} = 11 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$.

Із рис.8 видно, що при однакових значеннях числа $E_{ж}$ насадки РНІІ, РНІІІ і РНІV характеризуються меншими питомими затратами енергії E^* .

Використовуючи даний підхід був також розглянутий випадок дозованого зрошення насадки водою. Аналіз такої ситуації проводився із урахуванням відсутності затрат на роботу насосу.

$$E^* = \left(\frac{1}{N_F} \right) \cdot \left[\frac{\Delta P}{G_c} \right] \quad (10)$$

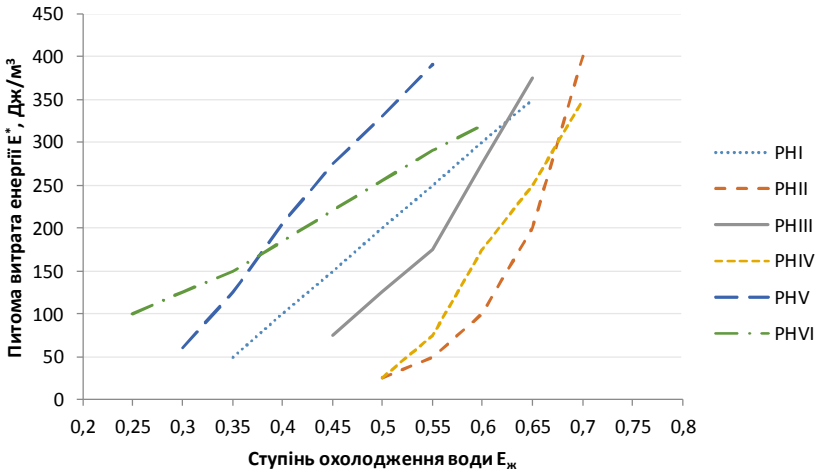


Рис.9. Залежність питомої витрати енергії E^* від $E_{ж}$ при $q_{ж} = 11 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ без урахування роботи насосу.

Відповідно отриманим даним можна зробити висновок відносно практичних рекомендацій: насадки РН, які складаються із листів ПЕТ та міпласта найбільш оптимальні за своїми якостями і характеристиками для використання в секціях зволоження СКП.

При вивченні областей застосування нових типів РН для зволоження повітря використовується метод оптимальних режимів проф. А.А. Римкевича (рис.10). Розглянуті всі класи тепловологістних навантажень приміщень. Для кожної зони зовнішнього клімату проведено порівняльний аналіз вихідної ТДМ СКП з умовами виконання ранжировок РА-2 і РА-3, за мінімізацією $G_{п}$ і $G_{ж}$, відповідно. При цьому весь зовнішній клімат умовно розподілен на дві зони: в першій витрата води зведена до мінімуму, у другій можливе отримання додаткової кількості вологи із атмосферного повітря.

Визначені границі зон:

$$\overline{\Delta d} = d_{н} - d_{в} + \frac{Q_{п}}{\varepsilon \cdot G_{н}}, \tag{11}$$

при $\overline{\Delta d} < 0$ – витрата $G_{ж}$ мінімізована,

при $\overline{\Delta d} > 0$ – отримаємо кількість $G_{ж}$ із атмосферного повітря.

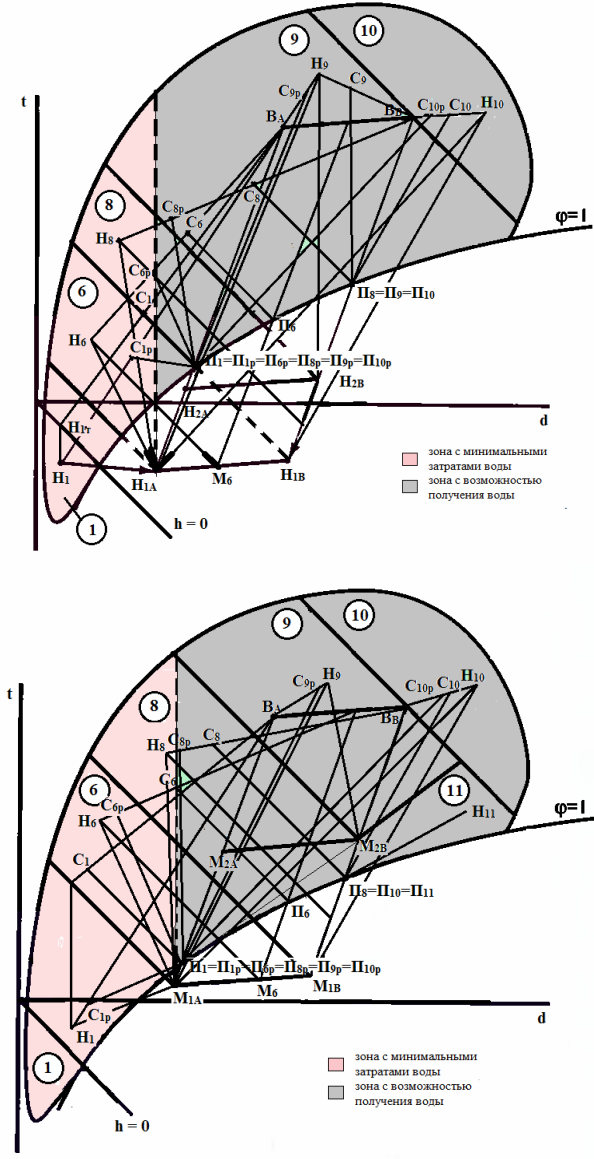


Рис.10. Обґрунтування використання РН для обробки зовнішнього повітря: ліворуч – другий клас навантажень, праворуч - третій.

Для приміщень (машинне відділення, котельня), а також об'єктів, що характеризуються значними тепловими навантаженнями, обробка зовнішнього повітря для всього річного циклу роботи СКП може забезпечуватися зволожувачами з РН, як універсальним контактним пристроєм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Піщанська Н.О. Удосконалення поперечно точних апаратів зволоження повітря на основі насадок упорядкованої структури. – Афтореферат кандидатської дисертації.- Одеса, 2015.-22с.

2. Рымкевич А.А., Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – СПб: «АВОК Северо – Запад», 2003. – 304 с.