

УДК 532+697.94

С.В. Руденко, В.В. Челабчі

**ОРІЄНТАЦІЯ ПРОЕКТУ
«ПОВІТРООХОЛОДЖУВАЧІ НЕПРЯМОГО ВИПАРНОГО ТИПУ»**

У роботі аналізується область застосування охолоджувачів повітря непрямого випарного типу. Описано результати теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних за розглянутою проблемою.

Ключові слова: охолодження, повітря, випар, вода.

В работе анализируется область применения охладителей воздуха непрямого испарительного типа. Описаны результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных по рассмотренной проблеме.

Ключевые слова: охлаждение, воздух, испарение, вода.

The paper analyzes the scope of the indirect evaporative air cooler type. The results of theoretical and experimental studies performed on the considered problem.

Keywords: cooling, air, evaporation, water.

Вступ. Пріоритетними напрямками розвитку цивілізованого суспільства є: поліпшення санітарно-гігієнічних умов середовища мешкання. Не менш важливо забезпечення комфортних умов роботи для працівників портів і підприємств морської галузі, що поза сумнівом, сприятиме зниженню енергетичних витрат, підвищенню продуктивності праці та зниженню травматизму [1].

У розвинених країнах помітна частина ресурсів і електроенергії (до 35 %) витрачається на забезпечення комфортних умов середовища проживання. Виробництво електроенергії зв'язане з викидами в атмосферу великої кількості вуглекислого газу і шкідливих речовин, що веде до підвищення температури атмосфери і її забрудненню.

Тому важливим є розвиток ресурсозберігаючих і економічно ефективних технологій, забезпечення загальної екологічної безпеки. Цьому сприяє організація виробництва дешевих, екологічно безпечних охолоджувачів повітря з малими витратами електроенергії при виробництві і в експлуатації [2].

В даний час повсюдно використовуються компресійні кондиціонери. Основні недоліки будь-яких компресійних кондиціонерів:

– порівняно висока собівартість (використання кольорових металів, складна технологія виробництва, що вимагає використання дорогого обладнання) і високі енерговитрати при виробництві;

– високі витрати електроенергії при експлуатації (0,35-0,45 кВт на виробництво одного кВт холоду).

© Руденко С.В., Челабчі В.В., 2016

Для охолодження напіввідкритих і відкритих приміщень та робочих зон компресійні кондиціонери практично не застосовуються (витрати на їх експлуатацію невиправдано великі).

Аналіз існуючих способів виробництва холоду для комфортного кондиціонування повітря дозволяє виділити як перспективну екологічно чисту і економічну технологію – випарне охолодження повітря, коли як агент, що витрачається, використовується вода [3-4]. Ці технології відрізняються малими витратами електроенергії при виробництві і в експлуатації та низькою собівартістю. Найбільш перспективними в плані технології виробництва і в експлуатації представляються охолоджувачі повітря побічно-випарного типу.

Окрім того варіанти таких охолоджувачів повітря можуть за безпечуватися додатковими змінними насадками, що перетворюють їх (в холодний час року) в конвертори тепла. У цьому випадку відбувається зміна повітря в приміщенні, при якій повітря, що покидає приміщення, підігріває свіже, що поступає в приміщення. Використання модульного принципу дозволяє легко організувати виробництво установок по спеціальних замовленнях з незвичайними співвідношеннями габаритів, специфічного дизайну та ін.

Представляється перспективним використання охолоджувачів повітря побічно-випарного типу на транспортних і військових установках в польових умовах, коли потрібно створити комфортні умови при мінімумі витрат енергії.

Заслугує на особливу увагу можливість використання пересувних охолоджувачів повітря для забезпечення комфортних умов в приміщеннях і робочих зонах (в трюмах і інших напіввідкритих приміщеннях) [5].

Аналіз проблеми. Функціонування охолоджувачів повітря побічно-випарного типу засновано на використанні ефекту непрямого випарного охолодження у розвиненій системі каналів.

Основою апарату є тепло-масообміну насадка утворена сукупністю водонепроникних пластин (плівок), покритих зволоженням пористим матеріалом. Зовнішнє повітря поступає в сухі канали, де він охолоджується за рахунок теплообміну з сухою поверхнею пластини. Частина його прямує споживачу, а частина, що залишилася, прямує у вологі канали, де він насичається парами води, що випаровується з поверхні пористого матеріалу. На випаровування води відбирається тепло від повітря, що проходить в сухому каналі [3-5].

Вода (прісна, мінералізована або морська) є робочим агентом, що витрачається.

Охолоджувач повітря побічно-випарного типу відрізняється надто низьким споживанням електроенергії, яка витрачається тільки на прокачування повітря через охолоджувач [6-7] і частково (5-10 Вт) на обробку води.

Існують дві основні схеми організації потоків повітря [3; 5; 8]:

- схема перехресного струму (схема Мунтерса);
- схема протитечії (схема Нейхарта).

З точки зору мінімізації витрат на прокачування повітря схема Мунтерса має переваги. Проте схема Нейхарта дозволяє досягти нижчі температури охолодженого повітря.

В установках побічно-випарного типу можуть бути реалізовані різні варіанти схем руху повітря і способи подачі води до поверхні випаровування. Дослідженню ефективності охолоджувачів повітря побічно-випарного типу присвячено багато робіт, наприклад [9-11].

Знайти оптимальні схеми і режими роботи установок випарного охолодження повітря можна шляхом натурального експерименту при численних варіантних дослідженнях.

Обчислювальний (комп'ютерний) експеримент на основі математичного моделювання дозволяє провести дослідження швидше й дешевше [12]. Особливо важливо забезпечити достатню вірогідність одержуваних в експерименті результатів при мінімізації витрат.

Вірогідність інформації отриманої в обчислювальному експерименті в першу чергу залежить від того наскільки докладно й адекватно використовувані моделі описують процеси в системі. Моделі найчастіше формуються на основі феноменологічного підходу. Однак коли дослідженню підлягають уже існуючі системи, що перебувають в експлуатації, використовуються методи ідентифікації на основі обробки експериментальних даних. В багатьох об'єктах протікають взаємозв'язані процеси різної фізичної природи, що призводить до складної і громіздкої математичної моделі (система рівнянь різного типу).

Для вирішення окремих рівнянь успішно використовуються сучасні методи чисельного рішення. Проте спільне рішення усієї системи рівнянь математичної моделі об'єкту представляє певні труднощі.

Тому перспективним видається шлях використання комбінованого підходу. В цьому випадку результати моделювання процесів в окремих елементах об'єкту узагальнюються з використанням сучасних обчислювальних технологій. По суті справи створюється, тим або іншим способом, компактна математична модель кожного елемента об'єкту.

Комплексне моделювання процесів в об'єкті проводиться чисельними методами з використанням отриманих раніше моделей елементів.

Методичне забезпечення обчислювального експерименту.

Робота велася за такими основними напрямками:

- створення засобів надійного прогнозування технічних характеристик розроблюваних конструкцій (апарат математичного моделювання та експериментальна база);

– аналіз споживчого попиту, встановлення областей ефективного використання випарного охолодження повітря і виділення перспективних типів повітроохолоджувачів;

– розробка типових конструкцій повітроохолоджувачів і опрацювання вузлових питань технології виробництва.

Математичне моделювання процесів тепло- і масопереносу і обміну в повітроохолоджувачі проводилося на двох рівнях. Для окремих елементів (входи в канали, канали складного профілю або з турбулізаторами) в якості математичної моделі використовувалася система рівнянь Нав'є-Стокса і Фур'є-Кірхгофа в природних змінних. Для моделювання цих елементів був розроблений ряд оригінальних обчислювальних процесів [14-15]. Цей підхід дозволяє уточнити залежність коефіцієнтів тепло- і масообміну від режимів течії середовищ. В якості основної математичної моделі процесів переносу в повітроохолоджувачі використовувалася система диференціальних рівнянь першого порядку інваріантна до схеми руху потоків повітря.

Зв'язок між значеннями температури повітря в сухому і вологому каналах здійснювався за рахунок рівняння, що описує процес теплопередачі крізь стінку, яка розділяє канали, з урахуванням процесу випаровування води у вологий канал.

Розглядалися два способи подачі води до поверхні випаровування:

- підйом води в пористої пластини за рахунок дії капілярних сил;
- подача води зверху матриці.

Для моделювання подачі води капілярним способом необхідно знати; пористість матеріалу P_z , коефіцієнт Дарси K_d і максимальна висота підйому рідини в матеріалі H_s . Експериментальне визначення значень зазначених показників трудомістко й вимагає спеціального устаткування. Розроблено оперативний метод, який дозволяє без спеціального устаткування (використовуються тільки секундомір і мірна лінійка) визначити величини P_z/K_d і H_s [13], а саме ці показники потрібні для розрахунку масопереносу.

На жаль, як показали розрахунки і натурні експерименти, при інтенсивному випаровуванні води частина верхніх каналів осушується і ефективність охолодження повітря знижується. Тому в основному розглядався варіант примусової подачі води зверху матриці (рис.1).

Результати досліджень. Проводився обчислювальний експеримент і за його результатами було спроектовано і виготовлено модель та робочий варіант охолоджувача що працює за перехресною схемою течій. Результати обчислювального і натурального експерименту приведені на рис. 2 та рис. 3.

Результати обчислювального експерименту відбивалися лінією, а результати натурального експерименту – маркерами.

На рисунках використовуються позначення:

- t_a, d – відповідно температура і вологість атмосферного повітря;
- t_{out} – температура охолодженого повітря.

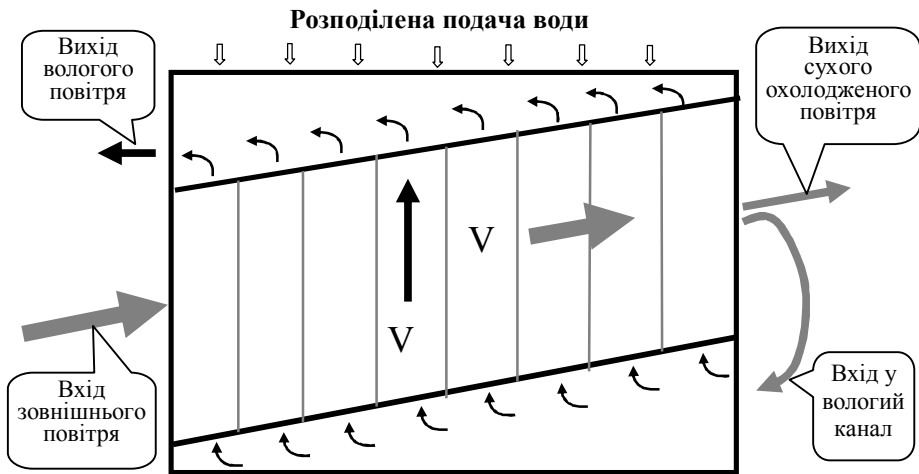


Рис.1. Схема перехресного струму (схема Мунтерса)

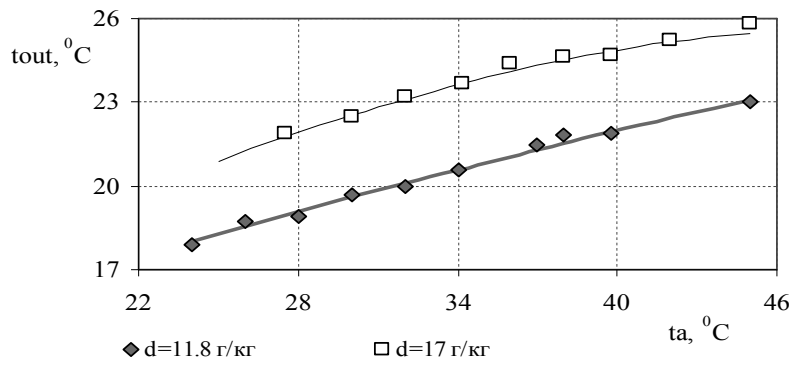


Рис. 2. Результати досліджень моделі охолоджувача

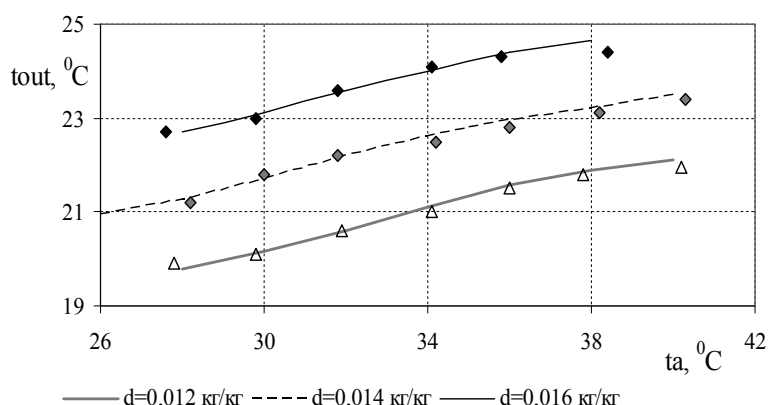


Рис. 3. Результати досліджень повномасштабного охолоджувача

Оскільки практично неможливо провести заміри параметрів повітря в каналах (зазор від 1,5 мм до 2 мм) фіксувалися інтегральні показники: температура і вологість повітря на вході і виході сукупності каналів.

Розроблені проекти модифікації виробів:

Варіант 1 – охолоджувачі для кабін транспортних засобів (автобуси і великовантажні автомобілі, катери, яхти) і для приміщень малою площею (до 20 м²). Продуктивність по повітрю 170-250 м³/год. при холодопродуктивності 0.8-1.2 кВт;

Варіант 2 – охолоджувачі для приміщень площею до 60 м², (а також салонів автобусів і інших транспортних засобів). Продуктивність по повітрю 600-900 м³/год. при холодопродуктивності 3-4,5 кВт;

Варіант 3 – охолоджувачі для приміщень площею 100 м² і більш, напіввідкритих майданчиків, торгових павільйонів і пр. Продуктивність по повітрю 1000-2400 м³/год. і більш при холодопродуктивності 6-12 кВт і більше.

Тепло-масообмінні насадки всіх типів виробів базуються на однотипних елементах. Використовуються звичайні відцентрові вентилятори або діаметральні вентилятори оригінальної конструкції.

Для виготовлення насадки використовуються дешеві, екологічно безпечні і поширені матеріали: пластини або плівки на основі поліетилену, полістиролу або поліпропілену і пористі неткані матеріали на основі поліпропілену або целюлози (флізелін).

Кольорові і чорні метали використовуються мінімально (тільки електродвигун вентилятора, мініатюрний пристрій подачі і обробки води і деякі елементи корпусу).

Можливо варіювання співвідношення габаритних розмірів в широких межах.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика охолоджувачів повітря

Показник	Компресійні (фреонові) кондиціонери	Охолоджувачі непрямого випарного типу	
		варіанти 1, 2	варіант 3
Сумарні відносні витрати електроенергії на виробництво холоду, кВт (електроенергії) / кВт (холоду)	0,30-0,45	0,06-0,12	0,05-0,09
Витрата води на виробництво 1 кВт часу холоду, кг	немає	1,7-2,0	1,9-2,0
Орієнтовна вартість виготовлення виробу (по відношенню до компресійних)	1	0,09-0,15	0,07-0,12

Для розроблених варіантів охолоджувачів повітря проведена оцінка собівартості виробів при їх дрібносерійному виробництві.

Залежність відношення S/V (собівартість/продуктивність по повітрю) від V (продуктивність по повітрю) наведена в таблиці 2.

Таблиця 2

Залежність відношення S/V від V

$V, \text{ м}^3/\text{г}$	300	600	900	1200	1800	2400
$S/V, \text{ гр./м}^3/\text{г}$	1,11	0,75	0,63	0,57	0,51	0,48

Очікуваний ефект від реалізації проекту:

- зниження енергетичних витрат на кондиціювання повітря в літній період в 5-8 разів і економія тепла в зимовий період на 10-15 %;
- мале витратне поліпшення умов праці і побуту за рахунок використання повітроохолоджувачів побічно-випарного типу;
- поліпшення екологічної обстановки за рахунок зниження шкідливих викидів в атмосферу при виробництві електроенергії;
- проникнення в незайняті сфери ринку з охолоджувачами повітря для відкритих і напіввідкритих приміщень і працюючими на морській воді.

Висновки. Повітроохолоджувачі побічно-випарного типу можуть використовуватися практично скрізь у побуті й промисловості, але особливо ефективні для напіввідчинених і відкритих приміщень. У цій області компресійні кондиціонери практично не застосовуються (витрати на їхню експлуатацію не виправдано високі). Охолоджувачі розглянутого типу можуть знайти застосування в місцях розташованих на березі моря або солоного озера при відсутності водопроводу й коли підвіз прісної води утруднений. Наприклад: окремі малі населені пункти, військові підрозділи й групи працівників, вилучені від центрів постачання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ломов О.П. Гигиенические основы обитаемости кораблей и судов / О.П. Ломов. – Л.: Судостроение, 1989. – 160 с.
2. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха / О.Я. Кокорин. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
3. Лавренченко Г.К. Разработка косвенно-испарительных воздухоохладителей для систем кондиционирования / Г.К. Лавренченко, А.В. Дорошенко // Холодильная техника и технология. – 1988. – № 10. – С. 29-33.
4. Меркт Р.В. Використання непрямого випарного охолодження повітря / Н.Ф. Латій, Р.В. Меркт, В.М. Челабчі // Матеріали VIII міжнародної НПК «Наука і освіта '2005». – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – Т. 61. Техніка. – С. 40-42.
5. Merkt R.V. Ecologically clean cool-production on ships / R.V. Merkt, V.N. Chelabchi // Proceedings of the 6-th Congress of the IMAM. – Varna, Bulgaria, 1993. – Vol. 3. – P. 173-179.
6. Патент № 2046257. Российская Федерация. МКИ6 F 24 F 3/14. Установка для косвенно-испарительного охлаждения / В.С. Майсоценко, Н.П. Видяев, В.Н. Челабчи и др. // Открытия. Изобретения. – 1995. – № 29. – 11 с.
7. Дорошенко А.В. Новое поколение систем кондиционирования воздуха на основе комбинированных испарительных охладителей / А.В. Дорошенко, В.Х. Кириллов, О.В. Ефимова, А.А. Клим-чук // Холодильная техника и технология. – 2000. – № 67. – С. 57-68.
8. Anisimov S. Numerical study of the cross-flow heat and mass exchanger for indirect evaporative cooling / S. Anisimov, D. Pandelidis // Proceedings of the Xth international scientific conference «Indoor Air and Environment Quality» (May 13-20). – Budapest, 2012. – P. 149-156.
9. Меркт Р.В. Экономичные охладители воздуха испарительного типа / Р.В. Меркт, В.Н. Челабчи, Т.А. Диденко // Промышленная теплотехника. – Т. 23. – № 2. – 2001. – С.51-53.
10. Меркт Р.В. Оптимизация воздухоохладителей испарительного типа / Р.В. Меркт, В.Н. Челабчи // Промышленная теплотехника. – Т. 25. – № 4. – 2003. – С. 167-168.
11. Меркт Р.В. Достижимые характеристики судовых охладителей воздуха испарительного типа / Р.В. Меркт, Н.Ф. Латій, В.Н. Челабчи // Сб. научн. трудов международной

- научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения науке, транспорте, производстве и образовании '2008». – Т. 4. – Одесса: Черноморье, 2008. – С. 33-36.
12. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): Матеріали 1-ї Міжнародної науково-технічної конференції (10-13 травня 2011 р., Черкаси). – Черкаси: Маклаут, 2011. – 512 с.
13. Меркт Р.В. Оперативная идентификация транспортных свойств капиллярно-пористых материалов / Р.В. Меркт, Н.Ф. Латий, В.Н. Челабчи // Сб. Современные направления теоретических и прикладных исследований. – Одесса: НИИМФ-ОНМУ, 2007. – Т. 3. – С.60-62.
14. Merkt R.V. Computer simulation of associated transfer processes / R.V. Merkt, V.V. Chelabchy // Зб. наук. праць. Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – № 2. – С. 37-47.
15. Челабчи В.В. Численное моделирование течений в каналах / В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи // Materiały VI Międzynarodowej naukowowi-praktycznej konferencji «Stosowane naukowe opracowania – 2010» // Przenysil: Nauka i studia. – 2010. – V. 8. – С. 17-22.
16. Merkt R.V. Economical coolers of air of the evaporated type / R.V. Merkt, V.N. Chelabchi, V.V. Chelabchi // Сб. научн. трудов Sword. – Вып. 3(36). – Т. 3. – Иваново: МАРКОВА АД, 2014. – С. 91 -93.

Стаття надійшла до редакції 14.10.2016

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні технології» Одеського національного морського університету
В.В. Вичужанін

доктор технічних наук, професор, в.о.завідувача кафедри «Вища математика» Одеської національної академії харчових технологій
В.Х. Кирилов