

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 697.91.94.97

Математичне моделювання процесів кондиціювання при використанні декоративних фонтанів для охолодження конденсаторів холодильних установок

Н. В. Жихарева¹✉, В. О. Козут,² В. М. Бушманов³¹⁻³Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹zhikhareva.nata@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-2643-6908>; ²<https://orcid.org/0000-0002-6385-2900>;³<https://orcid.org/0000-0002-2992-2880>

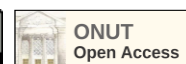
В роботі розглянуто моделювання процесів кондиціювання при використанні декоративних фонтанів для охолодження конденсаторів холодильних установок. Розглянутий метод теплового розрахунку фонтану враховує динаміку теплового навантаження від систем кондиціювання, сонячну радіацію, що поглинена водою, час роботи декоративних і робочих струменів, акумулюючу здатність води чаши фонтану та зміну параметрів зовнішнього повітря. Показано, що оборотну воду декоративних фонтанів доцільно використовувати для охолодження конденсаторів холодильних машин або в деяких випадках для безпосереднього охолодження повітря в поверхневих повітроохолоджувачах систем кондиціювання повітря. Модель дозволяє визначити добовий хід температури охолодженої води, аналізувати тепловий режим фонтану і вибирати оптимальний варіант роботи струменів по годинам доби. Середньодобова температура води в чаші фонтану при одному і тому ж тепловому навантаженні на нього залежить від часу роботи струменів і не залежить від акумулюючої здатності води чаши. Акумулююча здатність води чаши фонтану дозволяє при необхідності зрушувати між собою час роботи струменів і холодильної станції і знижувати амплітуду коливань температури охолодженої води. Для проведення досліджень розглянуті системи кондиціювання повітря, що працюють тільки в денний час, при великому об'ємі фонтану, акумулююча здатність якого проявляється за рахунок цілодобової роботи струменів. Показано, що можливо довести температуру охолодженої води в його чаші до температури води, що одержується в бризкальних басейнах і градирнях вентиляторного типу. За даними досліджень розроблена програма розрахунку процесів кондиціювання повітря при використанні декоративних фонтанів для охолодження конденсаторів холодильних установок та проведений чисельний експеримент.

Ключові слова: Тепловий розрахунок фонтану; Акумулююча здатність води; Кондиціювання повітря; Охолодження оборотної води; Коефіцієнт ефективності теплообміну струменів

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v6i1i2.3179>

© The Author(s) 2025. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

У наш час підсилення інтересу до нових і сучасних технічних засобів є основною умовою для

забезпечення максимального комфорту життєдіяльності людини. Одним з прикладів сприятливого й корисного впливу води на умови життя людини являється використання фонтанів. Декоративні

фонтани є елементом об'ємно-просторових композицій. Завдяки ним підтримується мікроклімат відкритих просторів міста і створюються сприятливі умови для відпочинку. У більшості випадків фонтани розташовуються близько монументальних будівель, які потребують влаштування в них систем охолодження. У цьому випадку, як показують дослідження, оборотну воду існуючих і знову проєктованих декоративних фонтанів доцільно використовувати для охолодження конденсаторів холодильних установок або безпосередньо для охолодження повітря в поверхневих повітроохолоджувачах систем кондиціонування.

При проектуванні оборотного водопостачання використовуються методи, що не враховують багато чинників систем кондиціонування повітря і це призводить до додаткових експлуатаційних витрат. Моделей розрахунку, що забезпечують оптимізацію не існує.

Запропонована модель теплового розрахунку фонтану враховує динаміку теплового навантаження від систем кондиціонування, сонячну радіацію, що поглинена водою, час роботи декоративних і робочих струменів, акумулюючи здатність води чаші фонтану та зміну параметрів зовнішнього повітря.

Таким чином, визначення добового ходу температури охолодженої води, аналіз теплового режиму фонтану і підбір оптимального варіанту роботи струменів по годинам доби є актуальним.

2. Постановка і мета задачі досліджень

Основною метою моделі теплового розрахунку фонтану є визначення температури води в його чаші, що можливо зробити після аналізу наступних складових теплового балансу фонтану:

- теплового навантаження від конденсаторів холодильних машин і циркуляційних насосів, сонячної радіації;
- охолодження води за рахунок тепло- і масообміну (в струменях і з поверхні чаші).

Крім того, потрібно враховувати акумулюючи здатність води в чаші фонтану та її вплив на добовий хід температури охолодженої води [1, 2,3].

Декоративні фонтани, які використовуються для охолодження води, можуть бути виконані за трьома схемами (рис. 1). Легко помітити, що схеми 1 і 2 виходять зі схеми 3, тому при розгляді завдання в загальному вигляді остання буде розраховною.

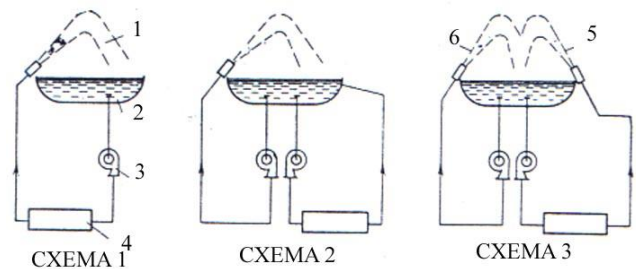


Рисунок 1 – Схеми фонтанів:

1 – струмінь; 2 – фонтан; 3 – насос;
4 – конденсатор; 5 – робочі струмені;
6 – декоративні струмені.

3. Основна частина

3.1. Метод та модель теплового розрахунку фонтану

Охолодження води за рахунок тепло- і масообміну в струменях є складною задачею. Для вирішення її зручно використовувати безрозмірний коефіцієнт ефективності теплообміну струменів

$$\eta = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{w1} - t_{вл}}, \quad (1)$$

де t_{w1} – температура води, що подається до насадки, °C; t_{w2} – температура охолодженої води в кінці струменя, °C; $t_{вл}$ – температура за мокрим термометром, °C.

При проектуванні фонтанів найбільшого поширення набули струмені, утворені циліндричними насадками.

В результаті теоретичних досліджень при визначенні коефіцієнта ефективності теплообміну струменів отримана наступна залежність [1, 2]:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + C\eta_0}, \quad (2)$$

де η_0 – коефіцієнт ефективності окремого струменя.

Рішення диференціального рівняння тепло- і масообміну між повітрям і водою струменя дозволило отримати формулу для визначення коефіцієнта ефективності окремої циліндричної струменя

$$\eta_0 = 1 - e^{-k \frac{G_n}{d_n^m}}, \quad (3)$$

де G_n – витрата води через насадки, л/сек;

d_n – діаметр насадка, м;

k, n, m – чисельні коефіцієнти, величини яких залежать від режиму розпаду струменя.

Для визначення величини C встановлена залежність

$$C = 555 \frac{B}{\sqrt{0,36 + 0,212w^2}} \cdot \frac{l}{h}, \quad (4)$$

де B – щільність зрошення, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$;

w – розрахункова швидкість вітру, м/сек ;

l – довжина чаші фонтану в напрямку переважаючого вітру, м ;

h – висота струминного обсягу фонтану, м .

Рівняння (1)-(4) дозволяють аналітично визначити коефіцієнт ефективності теплообміну струменів.

Якщо скласти рівняння теплового балансу фонтану, то з нього можна отримати диференціальне рівняння температури води в його чаші $t_{\text{ч}}$:

$$\frac{dt_{\text{ч}}}{d\tau} - f(\tau)t_{\text{ч}} = \psi(\tau), \quad (5)$$

де τ – час;

$$f(\tau) = \frac{L_p \eta_p + L_d \eta_d}{V} + \frac{AF}{\rho c V}; \quad (6)$$

$$\psi(\tau) = \frac{1 - \eta_p}{\rho c V} Q_{\text{кон}} + \frac{F}{\rho c V} q_{\text{рад}} + \left(\frac{L_p \eta_p + L_d \eta_d}{V} + \frac{AF}{\rho c V} \right) t_{\text{вл}}. \quad (7)$$

Рівняння (5) є лінійним диференціальним рівнянням першого порядку, загальне його рішення має вигляд [4, 7, 8]:

$$t_{\text{ч}} = \left[\int d\tau \psi(\tau) e^{\int f(\tau) d\tau} + C_1 \right] e^{-\int f(\tau) d\tau}. \quad (8)$$

Рівняння (5) важко вирішити через складність функцій $f(\tau)$ і $\psi(\tau)$. Його було вирішено із застосуванням середовища Matcad. Для знаходження координат точок-фокусів поля напрямків при визначенні температури води в чаші при вирішенні знайдені вирази

$$t_{\text{ч,напр}} = K_1 Q_{\text{кон}} + K_2 q_{\text{рад}} + t_{\text{вл}}, \quad (9)$$

$$\tau_{\text{напр}} = \tau_i + \delta, \quad (10)$$

де τ – година доби.

Зрушення направляючої δ знаходиться за формулою

$$\delta = \frac{\rho c V}{\rho c (L_p + L_d \eta_d) + AF}. \quad (11)$$

У рів. (9) величина $K_1 Q_{\text{кон}}$ може розглядатися як еквівалентний температурний приріст за рахунок навантаження від конденсаторів, а величина $K_2 q_{\text{рад}}$ – як еквівалентна температурного приросту за рахунок сонячної радіації.

Коефіцієнти K_1 і K_2 знаходимо з аналітичних формул [2,4, 6]

$$K_1 = \frac{1 - \eta_p}{\rho c (L_p + L_d \eta_d) + AF}. \quad (12)$$

$$K_2 = \frac{F}{\rho c (L_p + L_d \eta_d) + AF} = \frac{F}{1 - \eta_p} K_1. \quad (13)$$

У рів. (6), (7), (9)-(12) прийняті наступні позначення:

$t_{\text{вл}}$ – температура повітря за мокрим термометром;

ρ – густина води, кг/м^3 ;

C – питома теплоємність води, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

V – об'єм води в чаші фонтану, м^3 ;

L_p, L_d – витрата води на робочі і декоративні струмені, $\text{м}^3/\text{год}$;

F – горизонтальна поверхня чаші фонтану, м^2 ;

$Q_{\text{кон}}$ – теплове навантаження від конденсаторів, кВт ;

$q_{\text{рад}}$ – сонячна радіація, яка поглинається водною поверхнею чаші фонтану, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

η_p, η_d – коефіцієнти ефективності теплообміну робочих і декоративних струменів.

Величина A , що характеризує ефективність охолодження води за рахунок тепло- і масообміну з водної поверхні чаші фонтану, визначається за формулою

$$A = 20,4 \cdot (1 + 0,062 \cdot w), \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град} \quad (14)$$

де w – розрахункова швидкість вітру, м/сек .

Для кожної точки з заданим значенням $t_{\text{ч}}$ і τ легко можна знайти напрямок дотичних до шуканої кривої температури води в чаші. Лінії, у яких напрямок дотичних всюди збігається з напрямком поля, і являють собою рішення диференціального рівняння (5).

Середньодобова температура води в чаші фонтану при одному і тому ж тепловому навантаженні на нього залежить від часу роботи струменів і не залежить від акумулюючої здатності води чаші. Акумулююча здатність води чаші фонтану дозволяє при необхідності зрушувати між собою час роботи струменів і холодильної станції і знижувати амплітуду коливань температури охолодженої води [5, 6].

Для систем кондиціонування повітря, що працюють тільки в денний час, при великому обсязі фонтану, що акумулює, за рахунок цілодобової роботи струменів можна довести температуру охолодженої води в його чаші до температури води, одержуваної в бризкальних басейнах і градирнях вентиляторного типу.

Основне охолодження оборотної води фонтану відбувається за рахунок тепло- і вологообміну в струменях. Інтенсивність їх охолодження характеризується безрозмірним коефіцієнтом ефективності теплообміну (2), величина якого залежить від режиму розпилювання, витрати води, діаметра на-

садок, щільності зрошення, швидкості вітру, висоти струминного обсягу і довжини фонтану у напрямку вітру.

3.2. Результати математичного моделювання

На настурному етапі досліджувався вплив добового ходу температури охолодженої води, проаналізовано тепловий режим фонтану і обрано оптимальний варіант роботи струменів по годинам.

Величина запізнення знаходилась як відношення амплітуди коливань температури повітря фонтану до амплітуди коливань температури води в фонтані (після завершення перехідних процесів).

Математична модель дозволяє також визначати запізнення фази температурної хвилі, але оскільки цей параметр не враховується рів. (3), то запізнення фази не розглядалось. На рис. 2 наведена модель математичного розрахунку.

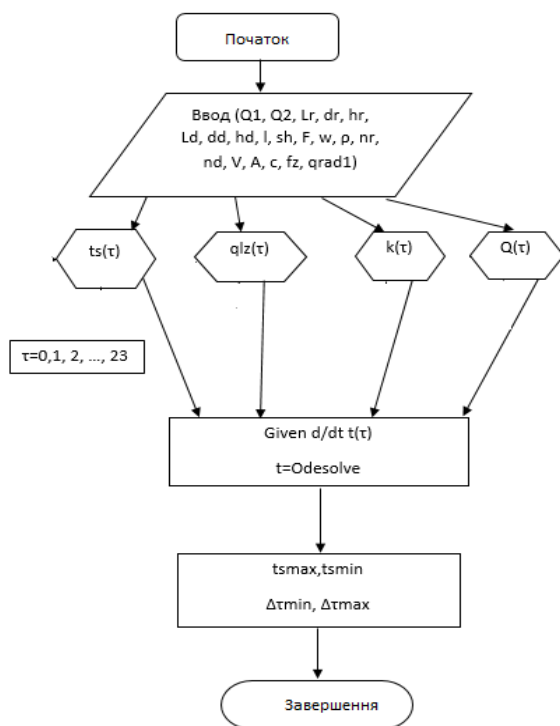


Рисунок 2 – Модель математичного розрахунку

Модель математичного розрахунку відноситься до багатофакторної, що дозволяє проводити аналіз режимів роботи в різні пори року.

На базі математичної моделі зроблена програмна реалізація в середовищі MathCad.

Теплове навантаження на фонтан від конденсаторів і циркуляційних насосів с 6 до 10 годин дорівнює 1046 кВт, з 10 до 18 годин – 1570 кВт/год. Продуктивність робочих струменів складає 0,075 м³/с, декоративних – 0,11 м³/с. Робочі

струмені діють з 6 до 18 год, декоративні – з 10 до 24. Діаметр насадок робочих струменів – 6 мм, висота струменів – 8 м, декоративні струмені мають діаметр 9 мм, висоту – 9 м, струмені похилі. Розмір фонтану 40х40 м, швидкість повітря – 1,5 м/с, акумулюючий обсяг – 1600 м³.

Визначаємо щільність зрошення, яка при роботі робочих струменів дорівнює 0,17, при роботі декоративних – 0,23, і при їх спільній роботі – 0,40 м³/(м²·год).

Відношення довжини чаші фонтану до висоти його струминного обсягу l/h при роботі тільки робочих струменів $40/80 = 0,5$, при роботі декоративних $40/10 = 4$.

Аналізуючи результати досліджень переконуємося, що на середньодобову температуру води в чаші великий вплив здійснює тривалість роботи струменів.

Модель теплового розрахунку фонтанів була перевірена на двох фонтанах, підключених до систем кондиціонування повітря. Коефіцієнт ефективності теплообміну струменів був перевірений на дослідній установці. Випробуванню піддавалися струмені, утворені циліндричними насадками з $dH = 2,3,4,5,6,8$ мм. Проведені дослідження показали задовільну збіжність з зазначеними теоретичними положеннями. Маючи дані по щільності зрошення, знайдена величина C . При роботі робочих струменів вона дорівнює 0,145, декоративних – 0,157, при їх спільній роботі – 0,302.

В програмі, що була написана в MathCad, зміна температури зовнішнього повітря $ts(\tau)$ і пряма та розсіяна радіація визначались методом сплайнів. Добовий цикл зміни середньоінтегральної температури води в чаші басейну розрахований за диференціальним рівнянням (15) При визначенні коефіцієнта теплопередавання враховувалося випаровування з поверхні чаші та охолодження струменя

$$\frac{d}{d\tau}t(\tau) + \frac{k(\tau)F(ts(\tau) - t(\tau))}{C} - \frac{Q(\tau)}{C} - \frac{Fqlz(\tau)}{C} = 0. \quad (15)$$

Також знайдено запізнення мінімуму температури води ($\Delta t_{\min} = 3,96$ °C, мінімум температури води $t_w = 20,36$ °C о 6-й годині ранку), запізнення максимуму температури води ($\Delta t_{\max} = 3,0$ °C, максимум температури води $t_w = 23,13$ °C о 18-й годині). Величина $\Delta t_{\max}$ менше, ніж $\Delta t_{\min}$, так як процеси поглинання тепла водою вдень інтенсивніше, ніж зранку.

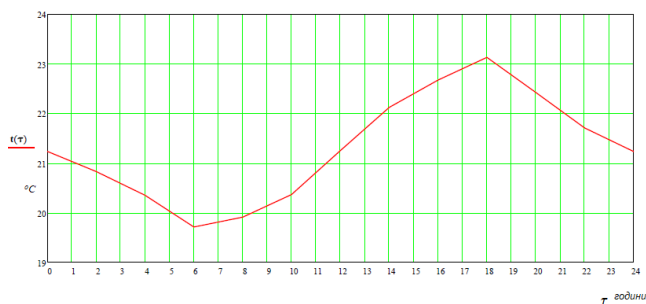


Рисунок 3 – Максимум та мінімум добової зміни температури води в чаші басейну в липні місяці:
 $t(\tau)$ – температура повітря $^{\circ}\text{C}$

Проведено уточнення значень мінімуму і максимуму добової температури зовнішнього повітря (рис. 3).

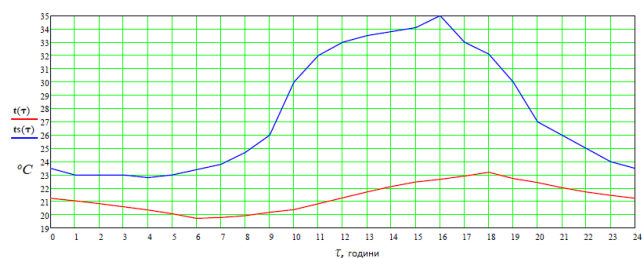


Рисунок 4 – Добова зміна температури повітря та води в чаші басейну в липні місяці:
 $t(\tau)$ – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$,
 $ts(\tau)$ – температура води в чаші фонтану, $^{\circ}\text{C}$

Викладена методика теплового розрахунку фонтанів була перевірена авторами на двох фонтанах.

4. Порівняльний аналіз теплового розрахунку та експерименту

Проведені дослідження показали задовільну збіжність з зазначеними теоретичними положеннями. Похибка числового експерименту $\Delta t = 4^{\circ}\text{C}$, що відповідає нормативному підохолодженню в подібних фонтанах.

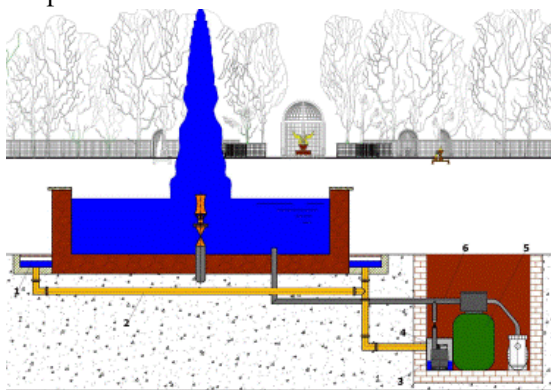


Рисунок 5 – Поздовжній профіль фонтану з урахуванням мінімізації втрат води

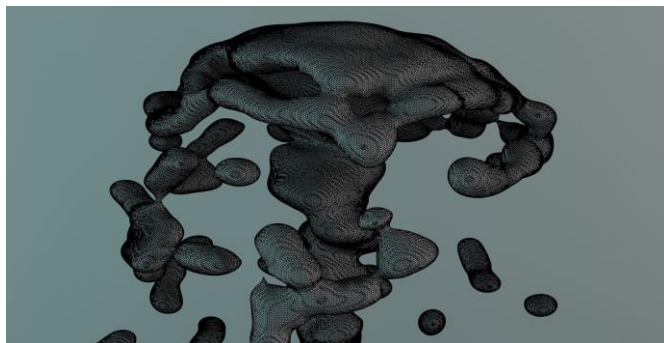


Рисунок 6 – Фонтан струмінь води – статична 3D модель

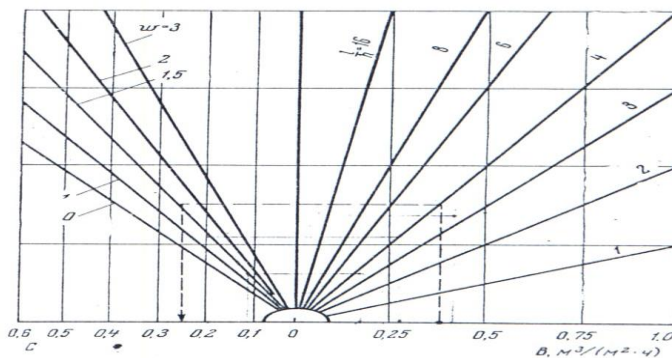


Рисунок 7 – Графік визначення коефіцієнта ефективності окремого циліндричного струменя

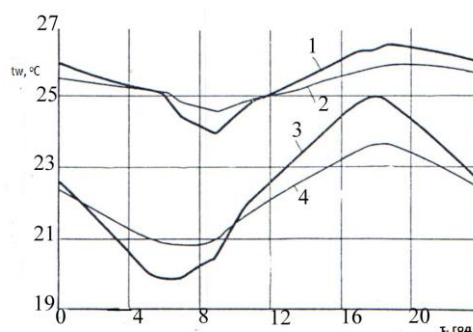


Рисунок 8 – Добовий хід температури води в чаші фонтану при різному режимі роботи струменів і різній місткості чаші : 1 – струмені працюють 12 год/доба, місткість чаші 1000 м^3 ; 2 – струмені працюють 12 год/доба, місткість чаші 2000 м^3 ; 3 – струмені працюють 24 год/доба, місткість чаші 1000 м^3 ; 4 – струмені працюють 24 год/доба, місткість чаші 2000 м^3

4. Висновки

Розроблена математична модель (її програмна реалізація в середовищі MathCad) забезпечує достатній рівень апроксимування задачі теплового розрахунку фонтанів, підключених до систем кондиціонування. Це дозволяє застосовувати модель для дослідження процесів кондиціонування повітря. Запропонований метод теплового розрахунку фонтану враховує динаміку теплового навантаження від систем кондиціонування, сонячну радіацію, що поглинена водою, час роботи декоративних і робочих струменів, акумулюючу здатність води чаші фонтану та зміну параметрів зовнішнього повітря.

За допомогою розробленої програми можливо визначити добовий хід температури охолодженої води, аналізувати тепловий режим фонтану і вибирати оптимальний варіант роботи струменів по годинам доби.

На базі математичної моделі обґрунтовані режимні параметри роботи фонтану залежно від пори року.

Література

1. Zhykharieva N., Khmelniuk M. Thermoeconomic Model of Air Conditioning System // Energy Engineering and Control Systems. – 2019. – Vol. 5. – P. 66-75.
2. Жихарєва Н.В. Інноваційні технології кондиціонування повітря в нестационарних умовах: монографія. – Одеса: ТЕС, 2022. – 264 с
3. С. М. Василенко, В. І. Павелко, А. В. Форсюк та ін. Теплохолодотехніка навч. посіб. – Київ: Ліра-К, 2019. – 258 с.
4. Купчик К., Бандурівська К. Засоби використання властивостей води в інтер'єрі // Вісник Львівської національної академії мистецтв. – 2012. – №. 23. – С. 37-41.
5. Лабай В. Й. Тепломасообмін. – Львів: Тріада плюс, 2004. – 260 с.
6. Жихарєва Н. В. та ін. Шляхи підвищення енергоефективності систем кондиціонування повітря в басейнах // Холодильна техніка і технологія. – 2017. – №53(5). – С. 47-51.
7. Жихарєва Н. В. Методика розрахунку систем кондиціонування повітря басейнів // Холодильна техніка і технологія. – 2015. – № 51(4). – С. 12-16

Отримана в редакції 17.05.2025, прийнята до друку 23.06.2025

Mathematical modeling of conditioning processes using decorative fountains for cooling condensers of refrigeration units

Nataliia Zhykharieva^{1✉}, Volodymyr Kohut², Volodymyr Bushmanov³

¹⁻³Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹zhikhareva.nata@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-2643-6908>; ²<https://orcid.org/0000-0002-6385-2900>;

³<https://orcid.org/0000-0002-2992-2880>

Modeling of conditioning processes using decorative fountains for cooling condensers of refrigeration units is considered. The considered method of thermal calculation of the fountain takes into account the dynamics of the thermal load from the air-conditioning systems absorbed by the water solar radiation, the working time of decorative and working jets, which accumulates the water capacity of the bowl of the fountain and changes in the parameters of the outside air. It is shown that it is advisable to use the circulating water of decorative fountains for cooling of condensers of refrigerating machines or in some cases for direct cooling of air in surface air coolers of systems of air conditioning. hours. The average daily water temperature in the bowl of the fountain at the same thermal loading depends on the time of the jets and does not depend on the accumulating capacity of the water of the bowl. The water capacity of the bowl of the fountain allows to shift the operating time of the jets and the refrigeration station and to reduce the amplitude of fluctuations in the temperature of the cooled water. For research, daytime air conditioning systems with a large volume of fountain are accumulated due to the flow of the jets around the clock. It is shown that it is possible to bring the temperature of the cooled water in its bowl to the temperature of the water obtained in the spray pools and cooling towers of the fan type. According to the research, a program of calculating the air conditioning processes using decorative fountains for cooling

condensers of refrigeration units was developed and a numerical experiment was conducted

Keywords: *Thermal calculation of the fountain; Accumulating the ability of water; Air conditioning; Cooling of circulating water; Coefficient of efficiency of heat exchange of jets*

References

1. **Zhikhareva, N., Khmelniuk, M.** (2019) Thermoeconomic Model of Air Conditioning System. *Energy Engineering and Control Systems*, 5, 66-75.
2. **Zhikhareva, N.V.** (2022) Innovative technologies of air conditioning in non-stationary conditions: monograph. *Odesa: TEC*, 264.
3. **Vasylenko, S. M., Pavelko, V. I., Forsyuk, A. V. et al.** (2019) Heat and Refrigeration Engineering. Manual. *Kyiv: Lira-K*, 258.
4. **Kupchik, K., Bandurovska, K.** (2012) Means of using water properties in the interior. *Bulletin of the Lviv National Academy of Arts*, 23, 37-41.
5. **Labai, V. J.** (2004) Teplomasoobmin. *Lviv: Triada plus*, 260.
6. **Zhykharieva, N. V et al.** (2017) Ways to improve the energy efficiency of air conditioning systems in swimming pools. *Refrigeration Engineering and Technology*, 53(5), 47-51.
7. **Zhykharieva, N. V.** (2015) Methods of calculation of air conditioning systems of swimming pools. *Refrigeration Engineering and Technology*, 51(4), 12-16.

Received 17 May 2025
Approved 23 June 2025
Available in Internet 04 July 2025