**Котов Б. І.**

д.т.н., професор

**Подільський державний
аграрно-технічний
університет****Грищенко В. О.**

к.т.н., ст. викладач

**Національний
університет біоресурсів
і природокористування
України****Панцир Ю. І.**

к.т.н., доцент

Герасимчук І. Д.

к.т.н., доцент

**Подільський державний
аграрно-технічний
університет****Kotov B.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Podolsk State Agrarian
Technical University****Hryshchenko V.**

Ph.D., Senior lecturer

**National University of Life
and Environmental
Sciences of Ukraine****Pantsyr Y.**

Ph.D., Associate Professor

Garasymchuk I.

Ph.D., Associate Professor

**Podolsk State Agrarian
Technical University****УДК 621.577.377****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-2-9****МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ
ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Одним з шляхів підвищення енергетичної ефективності процесу теплопостачання технологічних об'єктів і виробничих споруд АПК є застосування теплових насосів. Їх застосування дозволяє підвищити енергетичний потенціал теплоносіїв. Для оптимізації режимних параметрів і створення систем автоматичного керування теплонасосною установкою необхідно встановити зв'язок між параметрами процесів що протікають в елементах установки шляхом створення математичної моделі нестационарних теплових режимів.

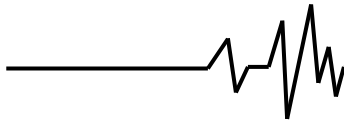
При аналізі останніх досліджень і публікацій встановлено що розрахунки процесів в теплових насосах представлені в основному для стаціонарних режимів роботи без врахування динаміки конденсатора. Якщо ж наводяться динамічні режими окремих елементів, то вони описуються математичними моделями значної складності, що значно утруднює їх практичну реалізацію.

В статті теплонасосна установка, як об'єкт моделювання, розглядається як фізична система, яка складається з чотирьох послідовно з'єднаних елементів : випарник, конденсатор, компресор, дроселюючий вентиль що утворюють замкнений ланцюг. Принцип роботи простої теплонасосної установки пояснюється схемою та графіком теоретичного циклу парокомпресорного теплового насоса. Для спрощення математичної моделі були зроблені певні припущення: зміна параметрів рідини, пари і повітря змінюється за прямолінійною залежністю, теплофізичні характеристики матеріалу теплообмінників, повітряних і парорідинних потоків, коефіцієнти теплообміну не залежать від температури і дорівнюють середнім значенням за цикл.

На основі теплового і матеріального балансу були складені відповідні диференціальні рівняння які становлять математичну модель динаміки зміни параметрів теплообмінника. Математична модель доповнена імітаційною моделлю в комп'ютерному середовищі MatLAB/Simulink, а також графічними інтерпретаціями динамічних характеристик.

Розроблена математична модель динаміки теплових процесів у теплонасосній установці може бути використана для розрахунку параметрів нагріву та охолодження потоків теплоносіїв і створення системи автоматичного керування ними.

Ключові слова: теплонасос, теплопостачання, випарник, конденсатор, компресор.



Вступ. Теплові насоси відносять до енергозберігаючих засобів, так як дозволяють підвищити енергетичну ефективність тепlopостачання технологічних об'єктів і виробничих споруд АПК за рахунок підвищення енергетичного потенціалу теплоносіїв. В якості джерела низькопотенціальної теплоти використовуються поновлювальні джерела енергії і вторинні енергоресурси – відпрацьоване вентиляційне повітря, відпрацьований сушильний агент зерносушарок, відпрацьоване тепло від гарячого водопостачання, нагрітий в геліоколекторах теплоносій та інших джерел. Найбільш розповсюджена теплонасосна система на основі компресорної холодильної машини в технологічних процесах агропромислового виробництва, як правило функціонує в нестаціонарних режимних умовах.

Для оптимізації режимних параметрів і створення систем автоматичного керування теплонасосною установкою (ТНУ) необхідно мати математичну модель нестаціонарних теплових режимів, яка встановлює зв'язок між параметрами процесів, що протікають в елементах ТНУ. Наявність цієї моделі дозволить провести числовий експеримент, з врахуванням різноманітних факторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичні і теплофізичні основи функціонування теплонасосних установок висвітлені у фундаментальних роботах [1,2]. Використання теплових насосів в різних галузях виробництва для опалення [3], гарячого водопостачання і опалення будівель [4], в технологічних процесах агропромислового виробництва [5,6], тепlopостачання споруд закритого ґрунту [7], сушіння сільськогосподарської сировини, в тому числі із використанням сонячної енергії [8].

Але в проаналізованих роботах [1–8] розрахунки процесів в теплових насосах представлено в основному для стаціонарних режимів роботи і наведені формули які визначають параметри для вибору елементів обладнання компресорних теплових насосів. В роботі [9] наведено математичні моделі динаміки повітроохолоджувача компресорної ХМ, без врахування динаміки конденсатора. Динамічні режими окремих елементів описано математичними моделями значної складності і надто детально, що значно утруднює їх практичну реалізацію [10].

Мета та завдання дослідження. Мета досліджень є проведення теоретичного аналізу теплових процесів компресорної установки і отримання спрощеної, в межах діючих теплофізичних законів математичної моделі динаміки температурних режимів.

Виклад основного матеріалу. Теплонасосна установка, як об'єкт моделювання,

являє фізичну систему, яка складається з чотирьох послідовно з'єднаних елементів, що утворюють замкнений ланцюг: випарник, конденсатор, компресор, дроселюючий вентиль. В найпростішій схемі теплонасосної установки використовується випарник і конденсатор в яких джерелом низькопотенційної теплоти є відпрацьований теплоносій (вентиляційні викиди виробничих приміщень або відпрацьований сушильний агент конвекційних сушарок), а до енергоспоживача подається повітря підвищеної температури (рис. 1). Свіже атмосферне повітря вентилятором (6) подається в теплообмінник конденсатора (2) де нагрівається від конденсації робочого тіла (холодоагенту) і поступає в технологічний об'єкт (5). Відпрацьований теплоносій з технологічного об'єкта (5) подається до теплообмінника випарника (4) де передає теплоту кип'ячому холодоагенту і виводиться зовні. Пара з випарника подається в компресор (1), де вона стискається (з підвищенням температури) (рис. 2) та подається до конденсатора (2). З конденсатора сконденсована рідина через дроселюючий вентиль (3) повертається до випарника (4). При дроселюванні температура рідкого холодоагенту знижується (рис. 2).

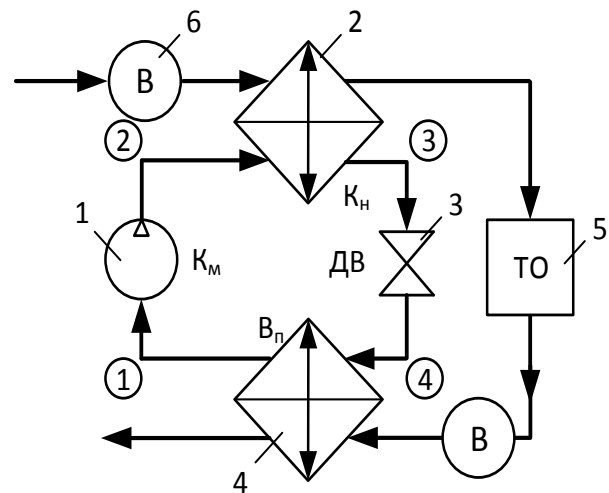


Рис. 1. Схема теплонасосної установки: 1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – дроселюючий вентиль; 4 – випарник; 5 – споживач (технологічний об'єкт); 6 – вентилятор атмосферного повітря; 7 – вентилятор відпрацьованого теплоносія

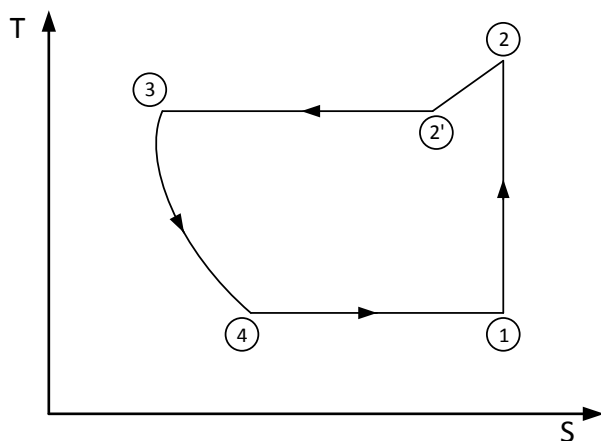
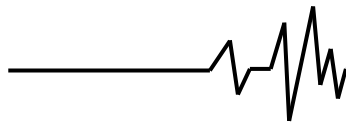


Рис. 2. Теоретичний цикл парокompресорного теплового насоса

Контури випарника і конденсатора являють собою звичайні системи, що складаються з двох рекуперативних теплообмінників об'єднаних циркуляцією речовини – холодоагенту, який при нагріванні переходить в пар, а при охолодженні та стисканні перетворюється в рідину. Тому, при складанні математичного опису теплового насоса можна використовувати моделі теплообмінних апаратів, вводячи припустиму ідеалізацію процесів теплообміну, яка не має протиріччя фізиці процесів випаровування (кипіння) і конденсації.

Прийmemo, що при незначній довжині циркуляційних контурів, зміна параметрів рідини, пари і повітря вздовж просторових координат відбувається за прямолінійною залежністю; це дає можливість застосовувати моделі із зосередженими параметрами для усіх елементів теплообмінного обладнання. Приймемо також, що в процесі конденсації холодоагент перетворюється із пари в рідину «зосереджено», тобто на вхід конденсатора поступає пара з температурою t_{n1} , а на виході з апарата конденсат з температурою t_{k2} ; аналогічно, до випарника потупає рідина з температурою t_{p1} , а на виході пара з температурою t_{n2} . Теплота акумулюється в повітряних ємностях і парорідинних каналах апаратів. Теплофізичні характеристики матеріалу теплообмінників, повітряних і парорідинних потоків, коефіцієнти теплообміну від температури не залежать і дорівнюють середнім значенням за цикл.

Вихідними диференціальними рівняннями що описують динаміку теплообміну у випарнику є рівняння теплового та матеріального балансу [9]:

– для повітряного потоку вторинного джерела енергії:

$$m_{vo}c_v \frac{dt_{v2}}{d\tau} = G_v c_v (t_{v1} - t_{v2}) - \alpha_1 F_1 (\bar{t}_v - \theta_c) - Q_k; \quad (1)$$

– для стінок випарника (трубчатого):

$$m_c c_c \frac{d\theta_c}{d\tau} = \alpha_1 F_1 (\bar{t}_v - \theta_c) - \alpha_2 F_2 (\theta_c - \bar{t}_{xa}) + Q_k; \quad (2)$$

– для потоку холодоагенту:

$$m_x c_x \frac{dt_{n2}}{d\tau} = G_x c_x (t_{p1} - t_{x2}) + \alpha_2 F_2 (\theta_c - \bar{t}_{xa}); \quad (3)$$

– теплота, що виділяється на поверхні теплообмінника при конденсації вологи з повітря:

$$Q_k = \sigma_o r F_1 (\bar{d}_v - d''(\theta_c)); \quad (4)$$

– рівняння матеріального балансу для вологого повітря:

$$m_v \frac{dd_{v2}}{d\tau} = G_v (d_{v1} - d_{v2}) - \sigma_o F_1 (\bar{d}_v - d''(\theta_c)); \quad (5)$$

де $t_{p1} = t_o$ – температура кипіння

холодоагенту; $\bar{t}_v = 0.5(t_{v1} + t_{v2})$;

$\bar{t}_{xa} = 0.5(t_o + t_{n2})$; $\bar{d}_v = 0.5(d_{v1} + d_{v2})$; θ_c

– температура стінки (поверхні випарника);

G_v, G_{xa} – масові витрати повітря і холодоагенту;

F_1, F_2 – зовнішня і внутрішня поверхні

теплообміну; α_1, α_2 – коефіцієнт теплообміну від

повітря і холодоагенту до стінки; σ_o – коефіцієнт

масовіддачі при конденсації вологи; $d''(\theta_c)$ –

температура насичення повітря при температурі

стінки; $m_{vo}c_v, m_c c_c, m_x c_x$ – теплоємність

повітря, теплообмінника, холодоагенту в об'ємах

елементів апарату; m – маса; c – питома

теплоємність.

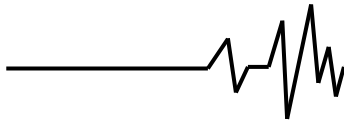
Кількість холодоагенту у випарнику

складається з маси пари m_n та рідини m_p .

Відповідно витрати холодоагенту в системі:

$$G_{xa} = G_n + G_p; \quad (6)$$

Витрати парової фаз можна визначити із співвідношення [9,10]:



$$G_n = G_{xa}\chi, \quad (7)$$

де
$$\chi = \frac{m_n}{m_n + m_p} = \frac{\rho_n}{\rho_n + \rho_p}$$

масовий вміст парів холодоагенту в контурі випарника.

Об'ємні витрати пари:

$$V_n = \frac{G_n}{\rho_n}, \quad (8)$$

де ρ_n – густина пари.

З урахуванням введених співвідношень, рівняння (3) переписемо у вигляді:

$$m_x c_x \frac{dt_{n2}}{d\tau} = \frac{\alpha_2 F_2}{\rho_n} (\theta_c'' - 0.5t_o - 0.5t_{n2}) - G_p \frac{q_o}{\rho_n} - q_v V_n. \quad (9)$$

В цьому рівнянні величина G_p визначає заповнення випарника холодоагентом, V_n – холодопродуктивність компресора (q_o – питома холодопродуктивність).

Диференціальні рівняння (1), (2), (5), (9) складають математичну модель динаміки температурного режиму випарника ТНУ.

Математична модель динаміки процесів теплообміну у повітряному конденсаторі при прийнятих спрощеннях може бути представлена диференціальними рівняннями зміни параметрів теплообмінника конденсатора і потоків на виході апарату.

Для потоку повітря, що нагрівається в конденсаторі:

$$m_x^k c_x^k \frac{dt_{k2}}{d\tau} = G_n c_n t_{n1} - G_p c_p t_{k2} - r\chi G_{xa} + \alpha_2^k F_2^k (\overline{t_{xk}} - \theta_{ck}), \quad (12)$$

де $G_n = G_{xa}\chi$;
 $G_p = G_{xa}(1 - \chi)$; r – питома теплота конденсації пари холодоагенту;
 $m_k c_v, m_{ck} c_{ck}, m_x^k c_x^k$ – теплоємність повітря в об'ємі теплообмінника конденсатора, стінки конденсатора та холодоагенту в об'ємі елементів конденсатора; $\overline{t_{xk}}$ – температура конденсації.

Зміна параметрів холодоагенту в часі (у рідкій і паровій фазах) при стисненні в компресорі і розширенні в дросельному клапані, не враховується, процеси вважаються стаціонарними:

– для компресора:

$$dt_{n2} = k'_2 dt_{n1}; \quad (13)$$

– для дросельючого клапану:

$$dt_{p4} = k'_1 dt_{p3}, \quad (14)$$

$$m_k c_v \frac{dt_{m2}}{d\tau} = G_m c_v (t_{m1} - t_{m2}) + \alpha_1^k F_1^k (\theta_{ck} - \overline{t_m}), \quad (10)$$

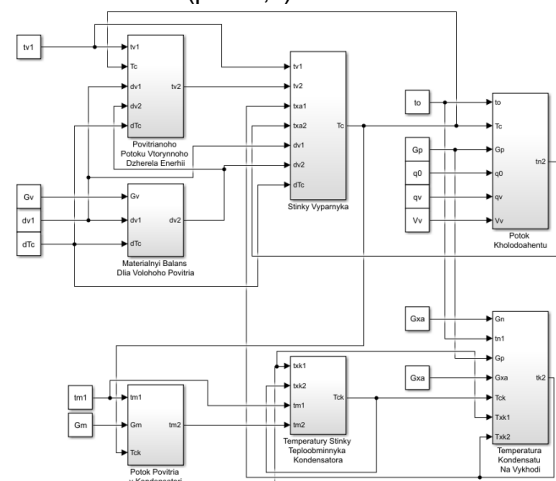
Для температури стінки теплообмінника конденсатора:

$$m_{ck} c_{ck} \frac{d\theta_{ck}}{d\tau} = \alpha_2^k F_2^k (\overline{t_{xk}} - \theta_{ck}) - \alpha_1^k F_1^k (\theta_{ck} - \overline{t_m}); \quad (11)$$

Для температури конденсату на виході:

де k'_1, k'_2 – коефіцієнти пропорційності; позначки (1–4) – точки на T-S діаграмі.

Таким чином отримані рівняння (1), (2), (5), (9) – (14) складають замкнуту динамічну модель ТНУ яка розв'язана в комп'ютерному середовищі MatLAB/Simulink (рис. 3,4).



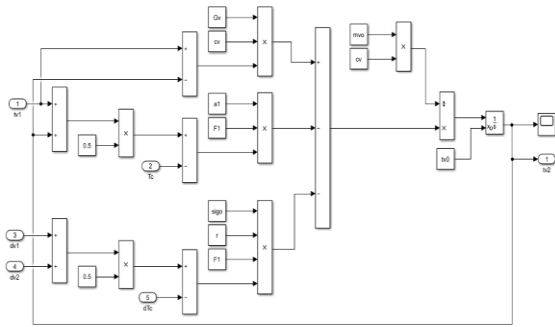
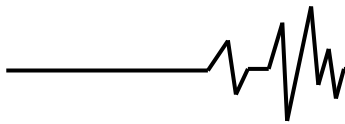


Рис. 3. Імітаційна модель ТНУ в комп'ютерному середовищі MatLAB/Simulink: а) загальна структура; б) вміст блоку підсистеми повітряного потоку вторинного джерела енергії

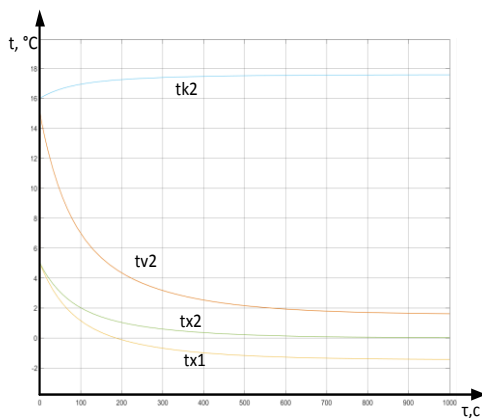


Рис. 4. Імітаційні динамічні характеристики ТНУ в комп'ютерному середовищі MatLAB/Simulink

Висновки. Розроблена замкнена математична модель динаміки теплових процесів у теплонасосній установці може бути використана для розрахунку нестационарних температурних режимів ТНУ: параметрів нагріву і охолодження потоків теплоносіїв, і на їх основі оптимізувати параметри установки та створення САК ними.

Список використаних джерел

1. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Негоциант, 2006. 712 с.
2. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системі теплохолодопостачання. Київ: ТОВ «Поліграф – Сервіс». 2008. 104 с.
3. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. Москва: КолосС, 2003. 532 с.
4. Пleshка М.С., Вырлан П.М., Стратан Ф.И., Булкин С.Г. Теплонасосные гелиосистемы отопления и горячего водоснабжения зданий. Ред. Стратана Ф. И. Кишинев: Штиинца, 1990. 119 с.
5. Чайченец Н.С. Теплонасосные сушильные установки для предприятий

агропромышленного комплекса (теория и техника) : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.18.12. Москва, 1990. 51.

6. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Чалаєв Д.М. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. 154 с.

7. Голуб Г.А., Кепко О.І. Математична модель теплонасосної системи теплопостачання споруд закритого ґрунту. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. 2002. Вип. 10. С. 275–278.

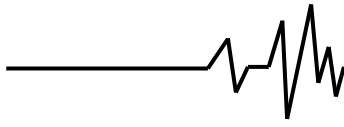
8. Чайченец Н.С., Гинзбург А.С., Мамбеткулов Е.Б., Чайченец С.С. Математическое моделирование процессов в теплонасосной сушильной установке с солнечным коллектором. *Теоретические основы химической технологии*. 1992. Вип. 26, № 5. С. 725–731.

9. Грищенко В.О. Типові технологічні процеси і холодильне обладнання для зберігання рослинної продукції: моделювання, динамічні режими, керування. Київ: ЦП КОМПРИНТ, 2018. 248 с.

10. Грищенко В.О. Особливості використання теплонасосних систем утилізації теплових викидів виробничих приміщень АПВ. *Обуховські читання: XV I Міжнародна науково-практична конференція*. 2021. С. 50–51.

References

1. Morozjuk T.V. (2006) Teoriya holodil'nykh mashin i teplovykh nasosov [Theory of refrigerators and heat pumps]. Odessa: Negotsiant, 712. [in Russian].
2. Sniezkin Yu.F., Chalaiev D.M., Shavryn V.S., Dabizha N.O. (2008) Teplovi nasosy v systemi teplokhodopostachannia [Heat pumps in the heat and cold supply system]. Kyiv: Poligraf-Service LLC. 104. [in Ukrainian].
3. Amerkhanov R.A. (2003) Optimizatsiya sel'skokhozyaystvennykh energeticheskikh ustanovok s ispol'zovaniem vozobnovlyayemykh vidov energii [Optimization of agricultural power plants using renewable energy]. Moscow: Kolos, 532. [in Russian].
4. Pleshka M.S., Vyrlan P.M., Stratan F.I., Bulkin S.G. (1990) Teplonasosnyye geliosistemy otopleniya i goryachego vodosnabzheniya zdaniy [Heat pump heliosystems heating and hot water supply of buildings]. Ed. Stratana F.I. Kishinev: Shtiintsa, 119. [in Russian].
5. Chaychenets N.S. (1990) Teplonasosnyye sushil'nyye ustanovki dlya predpriyatiy agropromyshlennogo kompleksa (teoriya i tekhnika) [Heat pump drying installations for enterprises of the agro-industrial complex (theory and technology)]. Abstract of thesis doctors of technical sciences: 05.18.12. Moscow, 51. [in Russian].
6. Sniezkin Yu.F., Paziuk V.M., Petrova Zh.O., Chalaiev D.M. (2012) Teplonasosna zernosusharka dlia nasinnievoho zerna [Heat pump



grain dryer for seed grain]. Kyiv: Poligraf-Service LLC, 154. [in Ukrainian].

7. Holub H.A., Kepko O.I. (2002) Matematychna model teponasosnoi systemy teplopstachannia sporud zakrytoho gruntu [Mathematical model of heat pump system of heat supply of closed ground structures]. Bulletin of Kharkiv State Technical University of Agriculture, 10. 275–278. [in Ukrainian].

8. Chaychenets N.S., Ginzburg A.S., Mambetkulov E.B., Chaychenets S.S. (1992) Matematicheskoye modelirovaniye protsessov v teponasosnoy sushil'noy ustanovke s solnechnym kollektorom [Mathematical modeling of processes in a heat pump drying installation with a solar collector]. Theoretical foundations of chemical technology. 26(5). 725–731. [in Russian].

9. Hryshchenko V.O. (2018) Typovi tekhnologichni protsesy i kholodylne obladnannia dlia zberihannia roslinnoi produktsii: modeliuвання, dynamichni rezhymy, keruvannia [Typical technological processes and refrigeration equipment for storage of plant products: modeling, dynamic modes, control]. Kyiv: TsP COMPRINT, 248. [in Ukrainian].

10. Hryshchenko V.O. (2021) Osoblyvosti vykorystannia teponasosnykh system utylizatsii teplovykh vykydiv vyrobnychyykh prymishchen APV [Features of use of heat pump systems of utilization of thermal emissions of production premises of APV]. Obukhov readings: XYI International scientific-practical conference. 50–51 [in Ukrainian].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Одним из путей повышения энергетической эффективности процесса теплоснабжения технологических объектов и производственных сооружений АПК является применение тепловых насосов. Их применение позволяет повысить энергетический потенциал теплоносителей. Для оптимизации режимных параметров и создание систем автоматического управления теплонасосной установкой необходимо установить связь между параметрами процессов протекающих в элементах установки путем создания математической модели нестационарных тепловых режимов.

При анализе последних исследований и публикаций установлена расчёты процессов в тепловых насосах представлены в основном для стационарных режимов работы без учета динамики конденсатора. Если же приводятся динамические режимы отдельных элементов, то они описываются математическими моделями значительной сложности, значительно затрудняет их практическую реализацию.

В статье теплонасосная установка, как объект моделирования, рассматривается как физическая система, которая состоит из четырех последовательно соединенных элементов: испаритель, конденсатор, компрессор, дросселируется вентиль образующих замкнутую цепь. Принцип работы простой теплонасосной установки объясняется схеме и графику теоретического цикла пароконденсационные теплового насоса. Для упрощения математической модели были сделаны определенные предположения: изменение параметров жидкости, пара и воздуха изменяется по прямолинейной зависимости, теплофизические характеристики материала теплообменников, воздушных и парожидкостной потоков, коэффициенты теплообмена не зависящим от температуры и равны средним значением за цикл.

На основе теплового и материального баланса были составлены соответствующие дифференциальные уравнения составляющих математическую модель динамики изменения параметров теплообменника. Математическая модель дополнена имитационной моделью в компьютерной среде MatLAB / Simulink, а также графическими интерпретациями динамических характеристик.

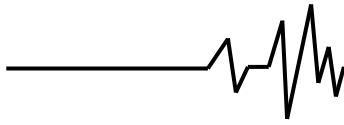
Разработана математическая модель динамики тепловых процессов в теплонасосной установке может быть использована для расчета параметров нагрева и охлаждения потоков теплоносителей и создание системы автоматического управления ими.

Ключевые слова: тепловой насос, теплоснабжения, испаритель, конденсатор, компрессор.

MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL MODES OF HEAT-PUMPING SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

One of the ways to increase the energy efficiency of the process of heat supply of technological facilities and production facilities of the agro-industrial complex is the use of heat pumps. Their use allows to increase the energy potential of heat carriers. To optimize the mode parameters and create systems for automatic control of the heat pump installation, it is necessary to establish a relationship between the parameters of the processes occurring in the elements of the installation by creating a mathematical model of non-stationary thermal modes.

In the analysis of recent studies and publications, it is established that the calculations of processes in heat pumps are presented mainly for stationary modes of operation without taking into account the dynamics of the condenser. If the dynamic modes of individual elements are given, then they are described by mathematical models of considerable complexity, which greatly complicates their practical implementation.



In the article, the heat pump installation, as an object of modeling, is considered as a physical system, which consists of four series-connected elements: evaporator, condenser, compressor, throttle valve forming a closed circuit. The principle of operation of a simple heat pump installation is explained by the scheme and schedule of the theoretical cycle of the steam compressor heat pump. To simplify the mathematical model, certain assumptions were made: the change in the parameters of liquid, vapor and air varies in a straight line, the thermophysical characteristics of the material of heat exchangers, air and vapor flows, heat transfer coefficients do not depend on temperature and are average for the cycle.

On the basis of thermal and material balance the corresponding differential equations which make mathematical model of dynamics of change of parameters of the heat exchanger have been made. The mathematical model is supplemented by a simulation model in the MatLAB / Simulink computer environment, as well as graphical interpretations of dynamic characteristics.

The developed mathematical model of dynamics of thermal processes in the heat pump installation can be used for calculation of parameters of heating and cooling of streams of heat carriers and creation of system of automatic control of them.

Key words: *heat pump, heat supply, evaporator, condenser, compressor.*

Відомості про авторів

Котов Борис Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32316, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

Грищенко Володимир Олександрович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, e-mail: bepeck2001@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7789-3650>).

Панцир Юрій Іванович - кандидат технічних наук, доцент, декан інженерно-технічного факультету Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32316, e-mail: panziruyuriy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2969-1936>).

Гарасимчук Ігор Дмитрович - кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32316, e-mail: igorgarasymchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4304-4447>).

Котов Борис Іванович - доктор технических наук, профессор кафедры Агроинженерии и системотехники Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, 32316, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

Грищенко Владимир Александрович - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматики и робототехнических систем им. акад. И.И. Мартыненко Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (ул. Героев Оборони, 15, г. Киев, 03041, e-mail: bepeck2001@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7789-3650>).

Панцирь Юрий Иванович - кандидат технических наук, доцент, декан инженерно-технического факультета Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, 32316, e-mail: panziruyuriy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2969-1936>).

Гарасимчук Игорь Дмитриевич - кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, электромеханики и электротехнологий Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, 32316, e-mail: igorgarasymchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4304-4447>).

Kotov Boris - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agroengineering and Systems Engineering of Podolsk State Agrarian and Technical University (Shevchenko St., 13, Kamenets-Podolsky, 32316, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

Grishchenko Vladimir - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Automation and Robotic Systems. acad. I.I. Martynenko of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine (15 Heroes Oborony st., Kiev, 03041, e-mail: bepeck2001@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7789-3650>).

Pantsir Yuriy - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Engineering and Technical Faculty of Podolsk State Agrarian Technical University (Shevchenko St., 13, Kamenets-Podolsky, 32316, e-mail: panziruyuriy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2969-1936>).

Garasimchuk Igor - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology of Podolsk State Agrarian Technical University (Shevchenko St., 13, Kamenets-Podolsky, 32316, e-mail: igorgarasymchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4304-4447>).