

Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Колесник В.В., Тришин В.В.

МЕТОДИКА ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ РОБОТИ ДВОСТУПІНЧАСТОЇ СУДНОВОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ В НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ

Метою роботи є розробка методики обґрунтування вибору моделі для аналізу роботи двоступінчастої суднової холодильної установки в нестационарних режимах. Поставлена мета досягається шляхом визначення рівнянь для холодопродуктивності в нестационарних режимах, а саме рівнянь енергетичного та матеріального балансів для теплообмінних апаратів. Розглянуто вираз для ентальпії всієї маси холодоагенту. Запропоновано вираз для формального представлення тепла, відведеного в апараті двоступінчастої суднової холодильної установки або підведеного до нього. Найважливішим результатом досліджень є методика обґрунтування вибору моделі для аналізу роботи двоступінчастої суднової холодильної установки в нестационарних режимах. Структурно запропонована методика складається з п'яти етапів. На першому етапі проводиться визначення маси рідкого та пароподібного холодоагенту в конденсаторі за товщиною плівки та щільністю конденсату за формулою Нуссельта, на другому етапі проводиться визначення кількості тепла, відведеного від конденсатора, за балансом тепла охолоджувальної води. На третьому етапі за результатами визначення витрати холодоагенту на виході з конденсатора обчислюється маса пари на підставі співвідношень з розрахунку характеристик проміжної судини. На четвертому етапі проводиться перетворення розрахунків для витрат холодоагенту за рахунок визначення витрати пара, що надходить у компресор із двох випарних систем. На заключному п'ятому етапі проводиться безпосередньо визначення холодопродуктивності двох випарних систем на нестационарному режимі. Таким чином, запропонована методика дозволяє визначити можливість застосування тієї чи іншої моделі для аналізу роботи суднової холодильної установки шляхом розгляду робочих процесів суднової холодильної установки в нестационарних режимах. Визначено, що комбіноване використання статичної моделі для визначення поля стаціонарних або квазістаціонарних режимів та лінеаризованої динамічної моделі дозволяє отримати доступний для інженерних розрахунків метод розрахунку динамічних характеристик вузлів, що дає результати з досить високою точністю.

Ключові слова: математична модель, методика, суднова холодильна установка, нестационарний режим.

Постановка проблеми. Особливістю робочого процесу судових холодильних установок флоту рибної промисловості є те, що ці установки працюють у широкому діапазоні змінних умов. Це призводить до того, що основними режимами роботи суднової холодильної установки виявляються (нестационарні) режими, що змінюються в часі, відмінні від розрахункового, передбаченого проєктом суднової холодильної установки, що вимагає детального аналізу робочих процесів з урахуванням впливу зазначених факторів.

Вирішення завдання аналізу роботи холодильних установок може проводитись різними методами, серед яких можна відзначити методи фізичного та математичного моделювання. Методи моделювання передбачають використання деякого допоміжного або штучного проміжного об'єкта (моделі), що має здатність у тому чи іншому сенсі замінити основний об'єкт.

Математичні моделі холодильних установок поділяються на статичні та динамічні.

Перші визначають робочий процес установки на різних стаціонарних, тобто тих, що встановилися в часі, умовах роботи холодильної установки на підставі статичних характеристик вузлів установки, методи визначення яких були розглянуті вище.

Динамічні моделі холодильних установок описують робочі процеси в умовах нестационарних, тобто таких, що не встановилися в часі, що проходять у різних вузлах. В їх основі лежать динамічні характеристики вузлів, що дають залежність зміни в часі різних параметрів робочого процесу за наявності тих чи інших збурень, що вносяться у процес. Можливість застосування тієї чи іншої моделі для аналізу роботи суднової холодильної установки можна визначити шляхом розгляду робочих процесів суднової холодильної установки в нестационарних режимах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню та розвитку суднової холодильної техніки присвячено низку робіт [1 - 10].

У праці [1] розглянуто моделювання на основі Simulink для дослідження продуктивності морської холодильної системи. Для теплової моделі компресора використовується стаціонарна модель без ітераційних обчислень. Через необхідність навчання та моделювання використовується додатково метод зосереджених параметрів та метод поділу для створення математичної моделі конденсатора, випарника, розширювального клапана, регулятора тиску випарника, холодильного сховища та інших частин.

У статті [2] описується множина додаткових обмежень, з якими стикається проектувальник при проектуванні холодильних систем для військово-морського флоту.

У статті [3] вивчалася система конденсації холодильного обладнання з компресійним охолодженням для вилучення органічних сполук під час операцій із завантаження сировою нафтою. Оптимальна конфігурація процесу та ідеальні робочі умови щодо тиску стиснення та температури охолодження були визначені шляхом моделювання процесу у поєднанні з багатоцільовою оптимізацією на основі економічних та екологічних оцінок витрат та переваг. Хоча встановлення системи вимагає досить великих початкових витрат, система виявилася економічно вигідною у довгостроковій перспективі, якщо було реалізовано оптимальні параметри системи. Метод, представлений у цьому дослідженні, може бути застосований до процесів оптимізації систем із різними значеннями факторів.

Наприклад, у роботі [4] розглянуто питання розробки системи діагностування суднових холодильних установок. Визначено, що надійність та енергоефективність технічної експлуатації суднових холодильних установок багато в чому залежить від своєчасного виявлення недоліків у роботі механізмів, та прийняття своєчасних об'єктивних рішень на підставі отриманих у режимі реального часу та оброблених термодинамічних параметрів за допомогою програмовано-логічних контролерів.

Мета дослідження. Мета роботи полягає у розробці методики обґрунтування вибору моделі для аналізу роботи двоступінчастої суднової холодильної установки в нестационарних режимах.

Основні результати дослідження. До складу двоступінчастої парокомпресійної холодильної установки входять такі апарати:

- 1) двоступінчастий компресор;
- 2) проміжний посуд;
- 3) конденсатор із лінійним ресивером;
- 4) дві випарні системи.

При цьому вимірювальні системи, наприклад, представляють системи морозильного комплексу і трюмів, що охолоджуються, режим роботи однієї з яких близький до стаціонарного, а режим іншої характеризується різко вираженою нестационарністю.

Ступінь нестационарності роботи характеризується зміною в часі температур, тиску, витрат холодоагенту у всіх апаратах, а також рівнів рідкого холодоагенту у ресивері h_r , у проміжній посудині h_{ps} і у першій випарній системі h_i (передбачається, що рівень холодоагенту у другій випарній системі такий самий).

Для визначення холодопродуктивності на нестационарних режимах розглянемо рівняння енергетичного та матеріального балансів для теплообмінних апаратів у такій формі:

$$GM_{in}e_{in} - GM_{out}e_{out} = Q_{out} + dE/d\tau, \quad (1)$$

$$GM_{out}e_{out} - GM_{in}e_{in} = Q_{in} + dE/d\tau, \quad (2)$$

$$GM_{in} - GM_{out} = dm/d\tau, \quad (3)$$

де $GM_{in}, GM_{out}, e_{in}, e_{out}$ – відповідно масові витрати та ентальпії на вході в апарат та на виході з нього;

Q_{in}, Q_{out} – тепло, відведене в апараті або підведене до нього;

E – ентальпія всієї маси холодоагенту, що знаходиться в апараті;

τ – час.

Ентальпія всієї маси холодоагенту визначається відповідно до виразу:

$$E = m_g e_g + m_p e_p = (m_g + m_p) \bar{e}, \quad (4)$$

Де m_g, e_g, m_p, e_p – маси та ентальпії рідкого та пароподібного холодоагенту, що знаходяться в даний момент часу в апараті.

Тоді тепло, відведене в апараті або підведене до нього, можна представити як:

$$Q_{in} = (GM_{in} + dm/d\tau)(e_{in} - e_{out}) + dm/d\tau (e_{in} - \bar{e}) - m d\bar{e}/d\tau, \quad (5)$$

$$Q_{out} = (GM_{in} + dm/d\tau)(e_{out} - e_{in}) + dm/d\tau (e_{in} - \bar{e}) - m d\bar{e}/d\tau. \quad (6)$$

Виходячи з виразів (1) – (6), методика зміни залежності холодопродуктивності від величин, що характеризують нестационарний процес роботи холодильної установки може бути представлена у вигляді таких етапів:

1) визначення маси рідкого та пароподібного холодоагенту в конденсаторі за товщиною плівки та щільністю конденсату за формулою Нуссельта;

2) визначення кількості тепла, відведеного від конденсатора, за балансом тепла охолоджувальної води;

3) з визначення витрати холодоагенту на виході з конденсатора обчислюється маса пари, що барботує, на підставі співвідношень з розрахунку характеристик проміжної судини;

4) перетворення розрахунків для витрат холодоагенту за рахунок визначення витрати тара, що надходить у компресор із двох випарних систем;

5) визначення холодопродуктивності двох випарних систем на нестационарному режимі.

Безпосередньо методика обґрунтування вибору моделі для аналізу роботи двоступінчастої суднової холодильної установки на нестационарних режимах полягає в реалізації таких положень:

1. Дотримання критерію квазістационарності для нестационарного режиму означає, що у цьому випадку може бути застосована квазістационарна модель явищ, заснована на використанні рівнянь стационарного режиму при підстановці миттєвих значень параметрів нестационарного режиму.

2. Використання критерію квазістационарності має дуже велике значення для аналізу робочих процесів і для експериментальних досліджень суднової холодильної установки, дозволяючи з усієї гами можливих нестационарних режимів виділити квазістационарні, для яких застосовна статична математична модель, і перехідні, різко виражені нестационарні режими, для яких необхідно моделі.

3. Результати експериментальних досліджень показують, що для більшості нерозрахункових режимів суднової холодильної установки навіть в умовах теплового навантаження, що різко змінюється, на випарні системи в межах точності експерименту реалізується критерій квазістаціонарності і без істотних похибок може бути застосована квазістаціонарна модель явищ, а для аналізу робочих процесів суднової холодильної установки можуть бути застосовані статичні характеристики вузлів.

4. Режими роботи, якими не реалізується критерій квазістаціонарності, називаються перехідними нестационарними режимами, характерними за наявності різних збурень у системах холодильної установки (зміна витрат робочих тіл, температур, тисків, теплових навантажень). Перехідні режими роботи є проміжні нестационарні режими переходу від одного стаціонарного або квазістаціонарного до іншого відповідного режиму, і розрахунок перехідних режимів, що виробляється на основі динамічної математичної моделі, є основою розрахунку систем регулювання холодильних установок.

5. Розв'язання систем диференціальних рівнянь високих порядків становить значні математичні проблеми навіть за використання відповідних обчислювальних засобів. У зв'язку з цим можуть застосовуватися різні методи спрощення розв'язання рівнянь динамічної моделі, серед яких найпоширенішим є метод лінеаризації диференціальних рівнянь.

Висновки. Розроблена методика обґрунтування вибору моделі для аналізу роботи двоступінчастої суднової холодильної установки в нестационарних режимах дозволяє визначити можливість застосування тієї чи іншої моделі для аналізу роботи суднової холодильної установки шляхом розгляду робочих процесів суднової холодильної установки в нестационарних режимах. Визначено, що комбіноване використання статичної моделі для визначення поля стаціонарних або квазістаціонарних режимів та лінеаризованої динамічної моделі дозволяє отримати доступний для інженерних розрахунків метод розрахунку динамічних характеристик вузлів, що дає результати з досить високою точністю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Liu Yun. Research on Simulation of Marine Refrigeration System Based on Simulink. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. № 552. P. 61-65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.552.61
2. Majgaonkar A. Refrigeration for Ships. *Ashrae Journal*. 2008. 50.
3. Lee Sangick, Choi Inhwon, Chang Daejun. Multi-objective optimization of VOC recovery and reuse in crude oil loading. *Applied Energy*. 2013. № 108. P. 439–447.
4. Очеретяний Ю. Розробка системи діагностування суднових холодильних установок. *Automation of Technological and Business Processes*. 2022. № 14. С. 35-41.
5. Голіков О.А. Суднові системи кондиціонування повітря. Київ : Наукова думка, 2000. 224 с.
6. Подмазко О.С., Піщанська Н.О. Суднова холодильна техніка. Конспект лекцій. Одеса: ОНАХТ, 2020. 59 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1O2GiWOWfmJdhCGCuCnrPWa9UJHyjb5wU/view?usp=sharing> (дата звернення: 05.05.2023)
7. Букарос В.М., Букарос А.Ю., Ромчук М.О. Адаптивна система керування електроприводом компресора. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. № 6 (4). С. 84-90.
8. Automation of the control processes of the refrigeration units condensers / V. Bukaros, O. Onishchenko et al. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: New solutions in modern technologies. 2017. № 23 (1245). P. 76-83.
9. Modernization of luenberger observer for control system of hermetic compressor electric drive / V. Bukaros, O. Onishchenko et al. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. Vol. 1. P. 230-237

10. Algorithm for estimation of ship refrigeration unit energy efficiency using full order observers / A. Bukaros, V. Bukaros et al. *Applied Aspects of Information Technology*. 2020. Vol. 3. No. 1. P. 418-430.

REFERENCES

1. Liu, Yun. (2014). Research on Simulation of Marine Refrigeration System Based on Simulink. *Applied Mechanics and Materials*, 552, 61-65. 10.4028/www.scientific.net/AMM.552.61.
2. Majgaonkar, Amey. (2008). Refrigeration for Ships. *Ashrae Journal*, 50.
3. Lee, Sangick & Choi, Inhwan & Chang, Daejun. (2013). Multi-objective optimization of VOC recovery and reuse in crude oil loading. *Applied Energy*, 108, 439–447.
4. Ocheretianyi, Yu. (2022). Rozrobka systemy diahnostuvannia sudnovykh kholodylnykh ustanovok [Development of a system for diagnosing ship refrigerating units]. *Automation of Technological and Business Processes*, 14, 35-41.
5. Holikov, O.A. (2000). *Sudnovi systemy kondytsionuvannia povitria* [Ship air conditioning systems]. Naukova dumka.
6. Podmazko, O.S. & Pishchanska, N.O. (2020). *Sudnova kholodylna tekhnika. Konspekt leksii* [Ship refrigeration equipment. Lecture notes]. ONAKhT. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1O2GiWOWfmJdhCGCuCnrPWa9UJHyjb5wU/view?usp=sharing>
7. Bukaros, V.M., Bukaros, A.Iu. & Romchuk, M.O. (2014). Adaptivna systema keruvannia elektropyvodom kompresora [Adaptive compressor electric drive control system]. *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protseviv*. 6 (4), 84-90.
8. (2017). Automation of the control processes of the refrigeration units condensers / V. Bukaros, O. Onishchenko et al. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: New solutions in modern technologies, 23 (1245), P. 76-83.
9. (2019). Modernization of luenberger observer for control system of hermetic compressor electric drive / V. Bukaros, O. Onishchenko et al. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, Vol. 1, P. 230-237
10. (2020). Algorithm for estimation of ship refrigeration unit energy efficiency using full order observers / A. Bukaros, V. Bukaros et al. *Applied Aspects of Information Technology*, Vol. 3, No. 1, P. 418-430.

Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Kolesnyk V.V., Tryshyn V.V.

METHODOLOGY OF MODEL SUBSTANTIATION FOR ANALYSIS OF OPERATION OF A TWO-STAGE SHIP REFRIGERATION UNIT IN NON-STATIONARY MODES

The aim of the work is to develop a methodology for justifying the choice of a model for analyzing the operation of a two-stage ship refrigeration unit in non-stationary modes. This goal is achieved by determining the equations for the cooling capacity at non-stationary modes, namely the equations of energy and material balances for heat exchangers. The expression for the enthalpy of the entire mass of refrigerant is considered. An expression for the formal representation of heat removed in or supplied to the apparatus of a two-stage ship refrigeration unit is proposed. The most important result of the research is a methodology for justifying the choice of a model for analyzing the operation of a two-stage ship refrigeration unit in non-stationary modes. Structurally, the proposed methodology consists of five stages. At the first stage, the mass of liquid and vaporous refrigerant in the condenser is determined by the thickness of the film and the density of the condensate according to the Nusselt formula. In the second step, the amount of heat dissipated from the condenser is determined by the heat balance of the cooling water. At the third stage, based on the results of determining the flow rate of the refrigerant at the outlet of the condenser, the mass of the vapor is calculated based on the ratios based on the calculation of the characteristics of the intermediate capacitance. In the fourth step, the refrigerant flow calculations are converted by

determining the flow rate of the tanks entering the compressor from the two evaporation systems. At the final fifth stage, the cooling capacity of the two evaporation systems in a non-stationary mode is directly determined. Thus, the proposed methodology makes it possible to determine the possibility of using a particular model to analyze the operation of a ship refrigeration unit by considering the work processes of a ship refrigeration unit in non-stationary modes. It is determined that the combined use of a static model to determine the field of stationary or quasi-stationary modes and a linearized dynamic model allows obtaining a method for calculating the dynamic characteristics of components that is accessible for engineering calculations and gives results with a sufficiently high accuracy.

Keywords: *mathematical model, methodology, ship refrigeration unit, unsteady-state mode.*