

3. Rotronics BMS (2024) How do unbalanced battery cells impact electric vehicle range and performance?" *Rotronics Technical Insights*. URL: <https://www.rotronicsbms.com/battery-tips/how-do-unbalanced-battery-cells-impact-electric-vehicle-range> (дата звернення 21.04.2026).

References

1. Marcis, Jana, et al. (2024) Mechanisms of degradation in liquid electrolyte Li-ion batteries." *Applied Energy* 305: 117854. URL: <https://doi.org/10.3390/en18020342>. (accessed 21.04.2026)

2. Ossila Ltd (2023) Internal Resistance of a Battery: Impact on Performance and Measurement." *Ossila Technical Library*. URL: <https://www.ossila.com/pages/internal-resistance-of-a-battery> (accessed 21.04.2026).

3. Rotronics BMS. (2024) How do unbalanced battery cells impact electric vehicle range and performance? *Rotronics Technical Insights*. URL: <https://www.rotronicsbms.com/battery-tips/how-do-unbalanced-battery-cells-impact-electric-vehicle-range> (accessed 21.04.2026).

УДК 697.3:621.577:621.564

Пастушенко Е. П., аспірант, ORCID 0009-0006-3148-9277,
наук. керівник: д-р техн. наук, проф. **С. В. Дубовський**,
ORCID 0000-0001-9418-2092,
«Інститут технічної теплофізики НАН України»

ОПАЛЕННЯ БУДІВЛІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМ ДВОСТУПЕНЕВИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ «ПОВІТРЯ-ВОДА» НА R744 (CO₂)

HEATING OF THE BUILDING WITH A HIGH-TEMPERATURE TWO-STAGE AIR-TO-WATER HEAT PUMP USING R744 (CO₂)

Анотація. Розглянуто варіант високотемпературного повітряного теплового насосу з робочим тілом CO₂ – R513a для опалення, охолодження та приготування гарячої води в будівлі з системою опалення у вигляді чавунних радіаторів. Бібл. 10.

Ключові слова: енергоефективність, теплові насоси з джерелом тепла у вигляді повітря, високотемпературні теплові насоси, двоконтурні теплові насоси, комп'ютерне моделювання, Flownex SE; коефіцієнт перетворення енергії.

Abstract. A variant of a high-temperature air heat pump with a working fluid of CO₂ – R513a for heating, cooling and hot water preparation in a building with a heating system in the form of cast iron radiators is considered. Ref. 10.

Keywords. energy efficiency, air source heat pumps, high temperature heat pumps, double-circuit heat pumps, computer simulation, Flownex SE; energy conversion coefficient.

Вступ. Загальні засади застосування високотемпературного теплового насосу «повітря-вода» з робочим тілом CO₂ та R513a.

Теплові насоси (ТН) широко визнані як ключова технологія чистої енергії в енергетичному переході до вуглецевої нейтральної енергетики. ТН, які працюють від електроенергії з низьким рівнем викидів, є центральною технологією глобального переходу до безпечного та стійкого опалення. ТН, особливо т. зв. «зелені» ТН – це установки і технології отримання теплоти з низьким вмістом

вуглецю, які мають потенціал для значного скорочення парникових викидів при теплозабезпечення промисловості і, особливо, будівель. Вони, як правило, використовують електроенергію для трансформації низькопотенційної теплоти навколишнього повітря, води або ґрунту чи скидної техногенної теплоти для опалення будівлі та її гарячого водопостачання (ГВП). Цей процес є ефективним, оскільки теплові насоси постачають від трьох до п'яти одиниць теплоти на кожен одиницю електроенергії, необхідної для їх роботи. Окрім високої енергоефективності, теплові насоси також використовують переважно відновлювану теплоту, тому 70–80 % теплової енергії, яку виробляє середній ТН, є теж відновлюваною. Якщо електроенергія, що використовується для приводу електричного компресора, виробляється з джерел з низьким вмістом вуглецю, то майже вся корисна теплота отримується в ТН також з низьким або навіть нульовим вмістом вуглецю. Тому ТН вважаються ключовим, економічно ефективним рішенням для боротьби з викидами вуглецю.

Останніми роками спостерігається доволі активне заміщення озоноруйнівних речовин, зокрема, на підставі HFC, природними холодоагентами. Зважаючи на те, що кінцевою речовиною – холодоагентом є CO₂, буде цілком логічним одразу здійснити перехід до теплових насосів на CO₂. Такі теплові насоси мають певні особливості.

Буде розглянуто тепловий насос, яким облаштовано будівлю Інституту Технічної Теплофізики. Його зроблено в багаторівневому виконанні. Верхній теплообмінник – випарник знаходиться на наддаховій надбудівлі. Компресорний блок знаходиться безпосередньо на даху. Теплообмінники – на верхньому поверсі будівлі (III поверх). Буферна ємність, під'єднана до існуючої системи опалення – на першому поверсі будівлі.

В процесі впровадження було розроблено схему, де перший (низькотемпературний) контур працює на CO₂, а другий контур (високотемпературний) – на R513a.

Метою досліджень є розробка та апробація методики розрахунку параметрів двоступеневого двоконтурного теплового насосу типу «повітря – вода» з використанням холодоагентів R744 (CO₂) та R513a для системи опалення адміністративної будівлі.

Мета роботи – розробка та апробація методики розрахунку параметрів двоступеневого двоконтурного теплового насосу типу «повітря – вода» з використанням холодоагентів R744 (CO₂) та R513a для системи опалення адміністративної будівлі.

Конкретною задачею дослідження є визначення параметрів роботи двоконтурного теплового насосу тепловою потужністю 120 кВт при температурі зовнішнього повітря до –25 °С для системи опалення адміністративної будівлі ІТТФ НАН України.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі головні завдання:

- розробити розрахункову модель двоконтурного теплового насосу з використанням програмного середовища Flownex SE;

- визначити основні термодинамічні параметри циклів холодоагентів R744 та R513a у характерних точках системи;
- дослідити вплив температури зовнішнього повітря у діапазоні від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ на основні експлуатаційні характеристики ТН;
- визначити залежності керуючих параметрів системи (обертів компресорів, ступеня відкриття регулюючих клапанів) від температури зовнішнього повітря;
- оцінити зміну теплової потужності, масових витрат холодоагентів та коефіцієнта енергоефективності теплонасосної системи.

Матеріал і результати досліджень. Для дослідження параметрів роботи двоступеневої теплонасосної системи використано метод комп'ютерного моделювання термогідрравлічних процесів у програмному середовищі Flownex SE. Це програмне середовище дозволяє моделювати складні енергетичні системи, що включають компресори, теплообмінники, трубопроводи та регулюючу арматуру, з урахуванням взаємодії теплових і гідрравлічних процесів. Розрахункова модель теплонасосної системи була побудована відповідно до розробленої принципової схеми. У моделі враховано основні елементи обох контурів ТН, включаючи компресори, випарники, конденсатори, міжконтурний теплообмінник та регулюючу арматуру.

Двоконтурний ТН функціонує за принциповою схемою, яка включає випарник «повітря–CO₂», компресори (на CO₂ – перший контур та на R513a – другий контур), конденсатор/випарник «CO₂–R513a», пароохолоджувач «CO₂-вода», переохолоджувач «R513a–вода», та інші допоміжні елементи.

Розрахунок базується на термодинамічному аналізі парокомпресійного циклу двоконтурного теплового насоса. Основна мета моделювання – визначити параметри робочого процесу (температури T , тиску P , ентальпії h , ентропії s в ключових точках циклу), розрахувати необхідну масову витрату холодоагентів m , споживану потужність компресорів W для досягнення заданої теплової потужності користувача Q .

Деталізація робочої схеми дозволяє не лише зрозуміти послідовність процесів у кожному контурі ТН, але й візуально зв'язати фізичні компоненти системи з їхніми термодинамічними станами, що є важливим для аналізу та оптимізації роботи двоконтурного теплового насоса. Всі компоненти були розділені на керуючі компоненти і компоненти залежні від керуючих.

Висновки. У роботі проведено дослідження параметрів двоступеневої двоконтурної теплонасосної системи типу «повітря – вода», призначеної для системи опалення адміністративної будівлі, із використанням холодоагентів R744 (CO₂) у першому контурі та R513a у другому контурі. На основі виконаного дослідження можна зробити такі висновки.

1. Розроблено розрахункову модель двоконтурної теплонасосної системи у програмному середовищі Flownex SE, яка дозволяє досліджувати термогідрравлічні процеси у системі та визначати основні параметри її роботи при різних температурних умовах зовнішнього повітря.

2. Виконано чисельне моделювання роботи теплонасосної системи тепловою потужністю близько 120 кВт у діапазоні температур зовнішнього

повітря від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отримані результати показали, що застосування каскадної схеми теплонасосу з використанням холодоагентів R744 та R513a дозволяє забезпечити стабільну роботу системи опалення будівлі у широкому діапазоні температурних умов.

3. Досліджено залежності основних експлуатаційних параметрів теплонасосної системи від температури зовнішнього повітря, зокрема теплової потужності, масових витрат холодоагентів, частоти обертання компресорів та коефіцієнта перетворення енергії COP.

4. Показано, що зі зниженням температури зовнішнього повітря спостерігається зменшення коефіцієнта енергоефективності теплонасосної системи, що пов'язано зі збільшенням роботи компресорів та зниженням температурного потенціалу джерела тепла. Разом з тим навіть при низьких температурах зовнішнього повітря теплонасосна система зберігає прийнятні показники ефективності.

5. Отримані результати моделювання підтверджують можливість застосування двоступеневих каскадних теплонасосних систем на базі холодоагентів R744 (CO_2) та R513a для тепlopостачання будівель з традиційними радіаторними системами опалення.

6. Розроблена модель теплонасосної системи може бути використана для подальшого дослідження режимів роботи теплонасосних установок та оптимізації їх параметрів при проєктуванні систем тепlopостачання будівель.

Додаткове застосування: отримані результати в частині опанування методики і програми розрахунку можна застосовувати при моделюванні теплотехнічного устаткування для термомаскування нагрітих об'єктів, зокрема при виконанні проєкту № 2025.06/0054 «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

Список використаних джерел

1. Басок Б. І., Дубовський С. В., Пастушенко Е. П., Нікітін Є. Є., Базєєв Є. Т. Теплові насоси як тренд низьковуглецевого розвитку енергетики. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2023. – Т. 75, № 2. С. 23–44. URL: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02> (дата звернення 24.03.2026).

2. Круковський Г. П., Басок Б. І., Скляренко Д. І. Комп'ютерне моделювання двоконтурного теплового насосу «повітря – вода» з використанням робочого тіла CO_2 при роботі в режимі нагрівання. *Проблеми теплофізики та теплоенергетики*: тези XIV Міжнар. онлайн-конф. (11–12 листопада 2025 р.). Київ: Симоненко О. І., 2025. – С. 116–117. URL: https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/11/zbirka-tez-2025_nova-1.pdf (дата звернення 24.03.2026).

3. Басок Б. І., Дубовський С. В., Пастушенко Е. П., Мороз М. В., Веремійчук Г. М. Активна утилізація теплоти димових газів біопаливного котла // *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2023. – Т. 77 – № 4 – С. 67–80. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.06> (дата звернення 24.03.2026).

4. Дубовський С. В., Бабін М. Є. Сезонна ефективність теплових насосів з газомоторним приводом // *Теплофізика та теплоенергетика*, 2019. – Т. 41 – № 5. С. 55.

5. Дубовський С. В., Басок Б. І., Бабін М. Є. Укрупнена оцінка теплової потужності та обсягів виробництва поновлювальної енергії тепловими насосами в Україні // *Теплофізика та теплоенергетика*, 2019. – Т. 41 – № 5 – С. 56.

6. Дубовской С. В., Басок Б. И., Твердохлеб А. С. Энергетична ефективність комбінованого виробництва тепла і холода // *Доповіді Національної академії наук України*, 2018. – № 4 – С. 47–53.

7. Про затвердження Методики обчислення частки енергії, виробленої тепловими насосами з відновлюваних джерел // Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України № 52 від 12.03.2018. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 03.04.2018 за № 395/31847.

8. Flownex Simulation Environment. Documentation. 2021.

URL: <https://flownex.com/resources/>; <https://flownex.com/industries/academic/>

(дата звернення: 23.01.2026).

9. Mitsubishi Heavy Industries. Q-ton: CO₂ air-to-water heat pump. Technical specifications. 2018. URL: https://vamco.info/downloads/specifications_q-ton.pdf (дата звернення 24.03.2026)

10. Neksa P. (2002) CO₂ heat pump systems // *International Journal of Refrigeration* – 25(4) – P. 421–427. URL: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00033-0) (дата звернення 24.03.2026)

References

1. Basok B. I., Dubovsky S. V., Pastushenko E. P., Nikitin E. E., Bazeev E. T. (2023) Heat pumps as a trend of low-carbon development of the energy sector // *Energy technologies and resource conservation* – Vol. 75 – No. 2 – P. 23–44.

URL: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02> (accessed 24.03.2026). (Ukr)

2. Krukovsky G. P., Basok B. I., Sklyarenko D. I. (2025) Computer modeling of a double-circuit heat pump “air-water” using the working fluid CO₂ when operating in heating mode. *Problems of thermal physics and thermal power engineering: theses of the XIV International online conference* (November 11–12, 2025). Kyiv: Symonenko O. I. – P. 116–117. URL: https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/11/zbirka-tez-2025_nova-1.pdf

(accessed 24.03.2026). (Ukr)

3. Basok B. I., Dubovsky S. V., Pastushenko E. P., Moroz M. V., Veremiychuk G. M. (2023) Active utilization of heat from flue gases of a biofuel boiler // *Energy technologies and resource conservation* – Vol. 77 – No. 4 – P. 67–80.

URL: <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.06> (accessed 24.03.2026). (Ukr)

4. Dubovsky S. V., Babin M. E. (2019) Seasonal efficiency of heat pumps with gas engine drive // *Thermal physics and heat power engineering* – Vol. 41 – No. 5 – P. 55. (Ukr)

5. Dubovsky S. V., Basok B. I., Babin M. E. (2019) An enlarged assessment of thermal capacity and volumes of renewable energy production by heat pumps in Ukraine // *Thermal Physics and Heat Power Engineering*. – Vol. 41 – No. 5 – P.56. (Ukr)

6. Dubovsky S. V., Basok B. I., Tverdokhleba A. S. (2018) Energy efficiency of the combined production of heat and cold // *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine* – No. 4. – P. 47–53. (Ukr)

7. On approval of the Methodology for calculating the share of energy generated by heat pumps from renewable sources: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine No. 52 dated 12.03.2018. Registered with the Ministry of Justice of Ukraine on 03.04.2018 under No. 395/31847. (Ukr)

8. Flownex Simulation Environment. Documentation (2021)

URL: <https://flownex.com/resources/>; <https://flownex.com/industries/academic/>

(accessed 03/24/2026)

9. Mitsubishi Heavy Industries. Q-ton: CO₂ air-to-water heat pump. Technical specifications. 2018. URL: https://vamco.info/downloads/specifications_q-ton.pdf (accessed 24.03.2026).

10. Neksa P. (2002) CO₂ heat pump systems // *International Journal of Refrigeration* – 25(4) – P. 421–427. URL: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00033-0) (accessed 24.03.2026).