

Хорольський В. П., д-р техн. наук, професор¹

Коренець Ю. М., старший викладач¹

Омельченко О. В., канд. тех. наук, доцент¹

¹ Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua.

ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПИТАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА ЗАМОРОЖУВАННЯ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ЙОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

UDC 681.5:621.565.92(045)

*Khorolskiy V. P., Grand PhD of Engineering Science,
Professor¹*

Korenets Yu. M., Senior Lecturer¹

Omelchenko O. V., PhD in Engineering sciences¹

¹ Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua.

WAYS TO SOLVING THE ISSUE OF THE OPTIMAL CHOICE OF EQUIPMENT FOR COOLING AND FREEZING FOOD BASED ON ITS ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT

Мета. Метою даної статті є пошук способів підвищення якості холодозабезпечення процесів охолодження та заморожування продуктів харчування різної природи в умовах обмеженості параметрів енергосистеми.

Методи. У роботі використано методи технічної діагностики, системного аналізу, математичного моделювання, ситуаційного управління, збору та обробки знань, теорії прийняття рішень, у тому числі з використанням засобів штучного інтелекту.

Результати. У статті представлено математичну модель для створення енергетично ефективних холодильних установок, на підставі проведених теоретичних досліджень розроблено метод підбору технологічного обладнання та представлено розрахунки енергоефективних режимів роботи обладнання для виробництва охолоджених та заморожуваних продуктів харчування, розроблено методіку формування діагностичних моделей для складних процесів, явищ, агрегатів, оснований на структуризації порушень за загальними симптомами. Наукова новизна очікуваних результатів полягає в розробці інтелектуальної системи керування енергоефективною холодильною установкою із застосуванням елементів автоматизації. Визначено, що інтегральним показником енергоефективності камер є споживання холоду за одиницю часу на тонну продукції, а вихідною базою енергетично-економічного аналізу роботи холодильних камер в реальних виробничих умовах є теплові баланси, які можуть бути отримані розрахунковим, дослідним та дослідно-аналітичним способами. Виявлено, що основним етапом енергетично-економічного аналізу є розробка математичних та багатофакторних кореляційних моделей енергетичних характеристик холодильних камер, які визначають залежність питомих витрат холоду (або електроенергії) на холодильну обробку продукції від основних «динамічних» параметрів їх експлуатації. Проведено аналіз та вибір оптимального обладнання за критерієм енергоефективності для виробництва заморожуваних продуктів харчування. Оптимальним в енергетичному плані обладнанням для виробництва заморожуваних продуктів харчування визначено апарати шоккової заморозки. Розглянуто основні завдання оперативного управління компресорними холодильними установками, принципи побудови системи управління на основі діагностики режимів роботи обладнання та вибрано стратегію управління компресорними установками з урахуванням нелінійних параметрів процесів холодозабезпечення холодильних камер.

Надійшла до редакції 29.03.2022 р.

© В. П. Хорольський, Ю. М. Коренець,
О. В. Омельченко, 2022

Ключові слова: охолодження, заморожування, промисловий холодильник, компресор, холодильна машина, енергоефективність, електроспоживання, синхронний двигун, асинхронний двигун, реактивна потужність.

Постановка проблеми. Основним завданням підприємств з виробництва холоду для переробної та харчової галузей України в стратегічному періоді до 2035 року є підвищення якості харчової продукції до вимог світового ринку харчування та зменшення питомих енерговитрат на 25–35% від рівня 2013 року.

Високий рівень енерговитрат для виробництва 1 т продукції підприємств харчової та переробної галузей стимулює їх енергетичний менеджмент до корпоративної реструктуризації процесів обліку та оптимізації енергоносіїв [1]. З метою зменшення собівартості продукції та підвищення її якості до рівня європейських стандартів на підприємствах харчової промисловості ведеться пошук методів управління виробництвом охолодженої і замороженої продукції харчування в умовах ринкових тарифів на електроенергію, а зниження енергетичних витрат на відповідні виробничі процеси є актуальним завданням енергоменеджменту до 2035 року.

Поставленого результату можна досягти шляхом впровадження на підприємствах з виробництва холоду автоматизованих систем управління електроспоживанням холодильних машин та промислових холодильників. Робота таких систем повинна бути узгодженою з оптимізацією технологічних процесів виробництва холоду — холодопостачання N холодильних камер [2] та енергетичних параметрів синхронних та асинхронних двигунів поршневих і гвинтових компресорів холодильних машин.

Таким чином, задача подальшого удосконалення принципів інтелектуального управління процесами електроспоживання потужних комплексів з виробництва охолоджуваних та заморожуваних продуктів харчування в системі енергозабезпечення підприємств-промислових холодильників в умовах обмежень енергопотужності системи електропостачання є актуальною та своєчасною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема ефективності систем енергопостачання підприємств різних галузей тісно пов'язана із стратегією розвитку енергетики України до 2035 року. Пріоритетний напрямок державної політики щодо енергозбереження на підприємствах харчової промисловості та створення зон високої енергоефективності висвітлено в працях [1, 2]. Принципи науково обґрунтованого управління енергозбереженням промислових холодильників підприємств харчової галузі на основі оптимізації технологічних режимів енергоємного обладнання розроблено вченими [3–6]. Системи автоматизованого комерційного обліку й управління електроспоживанням підприємств на базі сучасних SCADA систем розроблено у [7]. У реферованих працях доведено, що ефективність процесів електрозбереження у багатьох випадках залежить від удосконалення систем контролю витрат електрики і автоматизації енергоємних технологічних комплексів, методів штучного вирівнювання графіків навантаження [7–10], а також використання технологій управління збудженням синхронних двигунів з метою зниження плати за перетоки реактивної потужності та сплати за них [11].

Разом з тим, ефективність споживання електрики залежить від багатьох невирішених питань. Серед них: автоматизація електропостачання, вміння проєктантів розробляти системи інтелектуального управління інваріантними до збурень технологічних процесів в періоди обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень. Крім цього, недостатньо досліджень проведено щодо розробки багаторівневих систем управління електроспоживанням харчових комплексів з впровадженням інтелектуальних систем управління реактивними та активними потужностями підприємства у періоди обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень.

Метою статті є пошук способів підвищення якості холодозабезпечення процесів охолодження та заморожування продуктів харчування різної природи в періоди обмеженості параметрів енергосистеми.

Виклад основного матеріалу. Промислові смарт-холодильники великої продуктивності мають характерні ознаки, серед них головними є:

1. У їх холодильних камерах (контейнерах або приміщеннях) зберігаються і обробляються цінні і, найчастіше, швидкопсувні продукти, які потребують для збереження утримування певної температури, нижчої за температуру зовнішнього навколишнього середовища, та контроль відносної вологості повітря у визначених межах. У деяких випадках контролюється також повітряний обмін та склад газового середовища в камері (наприклад, при зберіганні фруктів у середовищі з підвищеним вмістом двоокису вуглецю або іншого газу).

2. Тепло і волога зовнішнього повітря за рахунок теплогазообміну легко можуть потрапити до об'єму холодильних камер, що вимагає створення спеціальних конструкцій огороження холодильних камер або контейнерів для зменшення проникнення теплоти і вологи із зовні до приміщень.

3. Великий об'єм вантажів знаходиться в стані руху, необхідність їх швидкого розвантаження вимагає широкого використання робототехнологічних комплексів, автоматизованого диспетчерського керування з використанням інтелектуальних технологій контролю якості продукції.

4. Холодильні підприємства віднесені до енергоємних та з підвищеним рівнем дотримання санітарних вимог, тому енергозабезпечення таких підприємств повинно бути віднесено до першої категорії енергопостачання.

5. З метою побудови інформаційних систем керування холодильними підприємствами необхідно побудувати відповідні бази прецедентів і знань:

по-перше, на основі моніторингу технологічних ситуацій заморожування (охолодження) продуктів харчування та діагностики режимів роботи холодильного обладнання, розробити математичні моделі температурних потоків повітря в холодильних камерах;

по-друге, розробити експертну модель оптимального мікроклімату холодильної камери для зберігання продуктів харчування з різними робочими характеристиками заморожування (охолодження тощо);

по-третє, оцінити енергетичні та технологічні режими роботи холодильних машин з очікуваним потенціалом енергозбереження, в яких працюють:

а) поршневі компресори з синхронними двигунами;

б) багатоступеневі компресорні холодильні машини з синхронними двигунами;

в) багатоступеневі компресорні холодильні машини з асинхронними двигунами і системами тиристорного частотного керування швидкістю за схемою АД-ТПЧ;

г) гвинтові компресорні установки з системами ступеневого розподіленого керування компресором і автоматизованого управління холодопродуктивністю з оцінкою тиску всмоктування й активної та реактивної потужностей, що дозволяє досягти за рахунок покращення ЖЦК і стабілізації тиск всмоктування зниження енергозатрат до 15%;

д) групи поршневих компресорів при роботі на холодильні камери із мінімумом споживання електроенергії;

по-четверте, розробити способи управління оптимальною траєкторією процесу охолодження та заморожування харчових продуктів в умовах обмеження потужності енергосистеми, у тому числі, спосіб мінімізації сплати за спожиту електроенергію при виробництві холоду групою компресорів із заданою холодопродуктивністю й визначенням компенсуючої спроможності синхронного електроприводу;

по-п'яте, розробити інтелектуальну систему автоматизованого управління холодозабезпеченням холодильних камер зі змінною структурою холодопродуктивності холодильних машин із заданим потенціалом енергозбереження.

Важливим чинником, що впливає на ефективність роботи промислового холодильного обладнання, є його енергоефективність. Оцінка енергоефективності холодильної системи за основною ознакою, тобто зниження енерговитрат, проводиться або методом емпіричних залежностей (наприклад, шляхом порівняння реальних холодильних коефіцієнтів), або із залученням сторонніх експертів.

Для досягнення енергоефективності діючих холодильних установок або таких, що знаходяться в стадії проєктування, необхідно обов'язкове проведення таких заходів:

1) експертна оцінка обраного обладнання і його компонування для забезпечення оптимальності співвідношення холодопродуктивності і енерговитратності;

2) енергоаудит обладнання на діючих виробництвах за результатами аналізу як мінімум річної експлуатації холодильних машин з урахуванням умов їх використання та сезонних коливань енергоспоживання.

Обладнанню, в залежності від рівня споживання енергії, присвоюється клас енергетичної ефективності. Існують «Правила визначення виробниками та імпортерами класу енергетичної ефективності товару та іншої інформації про його енергетичну ефективність». Згідно з цими правилами, встановлено класи і характеристики для холодильного обладнання. Найбільшою енергетичною ефективністю володіють прилади класу A+ і A++.

EER — індекс енергетичної ефективності при роботі на охолодження. Вказує на відношення холодопродуктивності (Q_x) при найвищому навантаженні до використовуваної потужності ($N_{спож.}$). Визначається формулою:

$$EER = Q_x / N_{спож.} \quad (1)$$

Існуючі показники енергоефективності холодильного обладнання (табл. 1), що визначають при сертифікаційних випробуваннях обладнання, не можуть характеризувати енергоефективність всієї системи холодопостачання для конкретного об'єкта (з урахуванням профілю теплового навантаження та інших особливостей).

Таблиця 1 — Показники енергоефективності, отримані при сертифікаційних випробуваннях холодильного обладнання

Найменування показника та його міжнародне позначення (розшифрування абревіатури)	Розрахункова формула	Примітка
Коефіцієнт енергоефективності (холодильний коефіцієнт)	$EER = q_x / q_{el}$, де q_x та q_{el} — відповідно максимальна холодопродуктивність і енергетична потужність, кВт	Відношення холодопродуктивності та електричної потужності при максимальній холодопродуктивності (завантаження обладнання 100%)
Європейський сезонний коефіцієнт енергоефективності ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio)	$ESEER = 0,03EER_{100\%} + 0,33EER_{75\%} + 0,41EER_{50\%} + 0,23EER_{25\%}$	$ESEER = 0,03EER_{100\%} + 0,33EER_{75\%} + 0,41EER_{50\%} + 0,23EER_{25\%}$ — коефіцієнт енергоефективності при завантаженні обладнання відповідно на 100, 75, 50, 25 %
Інтегральний показник енергоефективності при частковому завантаженні — IPLV (Integrated energy Part Load Values)	$IPLV = 0,01EER_{100\%} + 0,42EER_{75\%} + 0,45EER_{50\%} + 0,12EER_{25\%}$	
Коефіцієнт теплопровідності — COP (Coefficient of Performance)	$COP = q_m / q_{el}$ де q_m — максимальна теплова потужність в режимі теплового насоса, кВт	Відношення теплової та електричної потужності в режимі вироблення тепла (тепловий насос)
Загальний коефіцієнт енергоефективності TEER (Total Energy Efficiency Ratio)	$TEER = (q_{xp} + q_{mp}) / q_{el}$ q_{xp} та q_{mp} — холодопродуктивність та теплова потужність в режимі рекуперації тепла, кВт	Враховує одночасно вироблення холоду та рекуперацію тепла конденсатора

Енергоефективність системи холодопостачання пропонується оцінювати показником річної енергоефективності EP, що розраховується за формулою:

$$EP = (Q_x + Q_m) / Q_{el}. \quad (2)$$

Вихідні дані для розрахунку енергетичної ефективності наведено в табл. 2.

Надалі потрібно виконати розрахунки таких величин:

— очікуваний профіль навантаження (холод / тепло) на холодильне обладнання в залежності від кліматичних умов і технологічного призначення будівлі;

— поточна величина вироблення холоду і тепла, а також енергоспоживання (годинне, добове), диференційоване відповідно до вимог багатотарифного обліку електроенергії;

— сезонні (річні) витрати електроенергії всіма споживачами холодильної станції (холодильна машина, гідромодуль, градирня, зональні охолоджувачі) в залежності від характеристик і алгоритму управління обладнанням.

— холодильні камери та столи, морозильні шафи та ларі, бонети, льодогенератори, барні та винні шафи, диспенсери для заморозки допомагають зберігати м'ясо, овочі, фрукти свіжими, незалежно від зовнішніх умов подавати споживачам охолоджені напої і слідувати рецептам приготування різних страв.

Таблиця 2 — Вихідні дані для розрахунку енергетичної ефективності

Назва	Джерело інформації, розрахункова формула
Річна (сезонна) кількість виробленого холоду Q_x , кВт·год/рік	$\sum_{i=1}^n Q_{xi} = \sum_{i=1}^n q_{xi} \times \tau_{ix}$
Річна (сезонна) кількість виробленого тепла (в режимі рекуперації і теплового насоса) Q_m , кВт·год/рік	$\sum_{i=1}^m Q_{Ti} = \sum_{i=1}^m q_{Ti} \times \tau_{iT}$
Річна кількість витраченої електроенергії всім обладнанням холодильної установки Q_{el} , кВт·год/рік	$\sum_{i=1}^{n+m} Q_{eli} = \sum_{i=1}^{n+m} q_{eli} \times \tau_{iel}$

У таблиці 2:

1) τ_{ix} , τ_{iT} , τ_{iel} — кількість годин роботи обладнання, відповідно виробляючого холод, тепло та споживаючого електроенергію при i -й температурі зовнішнього повітря, год/рік;

2) q_{xi} , q_{Ti} , q_{eli} — відповідно загальна холодильна, теплова чи електрична потужність обладнання при різній температурі зовнішнього повітря, кВт.

Професійна техніка розрахована на тривалу експлуатацію за високих навантажень. Кожен вид обладнання підтримує закладену амплітуду низьких температур і виконує покладені на нього функції.

Холодильники будь-яких конфігурацій створені для того, щоб забезпечувати температурні умови від 0 °С до + 6 °С (іноді до + 10 °С), в той час як промислові морозильники гарантують –18 °С (деякі навіть до –48 °С) при зовнішній температурі повітря до + 43 °С.

Для різноманітних продуктів харчування використовують різне холодильне обладнання зважаючи на різні характеристики вхідних продуктів, яким потрібні відповідні умови охолодження. При виборі оптимального енергетичного обладнання беруть до уваги багато чинників, які можуть мати прямий або непрямий вплив на вихідний продукт та його якість.

Заморожування — зниження температури нижче точки замерзання соків харчових продуктів, так званої кріоскопічної точки. Майже вся рідина, що знаходиться в продукті, замерзає, тому припиняється діяльність мікрофлори і ферментів. Заморожені продукти можуть зберігатися тривалий час за умови підтримки стабільно низької температури. Кріоскопічна точка визначається кількістю розчинених у клітинному соку речовин. Для м'яса вона лежить в межах від +0,6 до +1,2 °С, для молока становить +0,55 °С, для яєць –0,5 °С, риби — від –0,6 до –2 °С.

Продукти заморожуються в морозильних камерах, де температура становить від -30 до -40 °С. Для продуктів, які планується зберігати протягом нетривалого часу, температура може бути на рівні від -8 до -12 °С. Тривале зберігання заморожених продуктів вимагає температури не вище -18 °С.

При виборі обладнання для заморозки високоякісних продуктів харчування на сьогоднішній день використовується безліч різних способів підвищення енергоефективності холодильних установок. Розглянемо лише деякі з них, які надають найбільший вплив на ефективність роботи і не потребують значних витрат коштів, такі як:

- використання частотних перетворювачів обертання двигунів компресорів;
- установка системи управління вентиляторами конденсатора;
- застосування більш ефективних холодоагентів;
- врахування географічного розташування при виборі холодильної установки;
- раціональне використання тепла, що віддається холодильним обладнанням;
- оснащення кожної конкретної холодильної установки або холодильного комплексу власною системою автоматизації;
- використання енергоефективних компресорів;
- застосування плавного регулювання продуктивності компресорів;
- оптимізація роботи обладнання при мінімальному навантаженні;
- застосування агрегатів з двоступінчастим стисненням.

Для тривалого холодного зберігання харчових продуктів зі збереженням їх якості застосовується заморожування. Зараз в замороженому вигляді реалізуються не тільки такі продукти, як морозиво, м'ясо, риба, морепродукти, овочеві асорті, але і досить велика кількість кулінарних продуктів, починаючи від кондитерських виробів, зокрема, тортів, тістечок і бісквітів, і закінчуючи піцою та хлібом. Споживання заморожених продуктів постійно зростає в усьому світі. У розвинених країнах, наприклад, у Франції, за останні 10–15 років воно збільшилося в 10–15 разів, досягнувши рівня 35–40 кг на душу населення за рік.

Для заморожування існує багато способів, машин та апаратів, але з великим відривом випереджає один енергоефективний спосіб, який має ряд переваг. Шокове заморожування дозволило вирішити питання зі зберіганням в промислових масштабах продуктів харчування, напівфабрикатів, м'яса, риби, овочів і фруктів.

Сьогодні найбільш поширеним способом зберігання харчових продуктів є розміщення в холодильних камерах. Однак, звичайне заморожування не дозволяє зберігати продукти занадто довго, та й якість розморожених продуктів в більшості випадків різко знижується. І тут на допомогу приходить шокове заморожування — технологія, яка стала справжнім проривом для бізнесу, ресторанного господарства, споживачів. Основна ідея цього процесу в максимальному прискоренні режимів охолодження продукту. Був встановлений тісний взаємозв'язок між швидкістю заморожування і якістю харчових продуктів. Численні експерименти підтверджують вплив тривалості заморожування на величину кристалів льоду, на структуру і склад ферментів продукту. Шокове заморожування — це швидке охолодження в спеціальних приміщеннях, наприклад, камерах шокової заморозки боксового типу, при температурі близько -35 °С.

Тривале зберігання продуктів харчування зі збереженням їх високих споживчих властивостей забезпечують агрегати шокової заморозки. Головне призначення цього обладнання полягає в тому, щоб уникнути утворення великих кристалів льоду, що руйнують тканини та міжтканинні оболонки.

Апарат шокової заморозки представляє собою пристрій, за допомогою якого можна охолодити (до $+3$ °С) або заморозити (до -25 °С і нижче) великий обсяг продукції за період часу до 90 хвилин.

Незважаючи на велику різноманітність обладнання для шокової заморозки, визначальною характеристикою машини є її конструктивна схема — бокс, тунельна камера або установка спірального типу.

Камери шокової заморозки бокси за своєю конструкцією близькі до однокамерних побутових холодильників і холодильників випарного типу. Випарник розташову-

ється вгорі або збоку камери і генерує теплопередачею холодне повітря, що опускається донизу.

Камери бічного типу відрізняються від звичайних морозильних камер тим, що в них використовується більш потужний компресор, а також один або кілька вентиляторів, потрібних для рівномірного розподілу холоду й прискорення процесу.

Бокси невеликих розмірів призначені для установки туди окремих лотків. Великі агрегати розраховані на завантаження продукції за допомогою мобільних візків. Їх використовують для заморозки м'яса, овочів, фруктів, ягід, грибів, готових страв, напівфабрикатів.

Камери шокової заморозки крім своєї високої продуктивності цікаві значною адаптивністю. За рахунок великого діапазону можливих графіків охолодження одну і ту ж лінію можна налаштувати як на заморозку м'ясних продуктів, так і на обробку рослинних продуктів.

З економічної точки зору, організація морозильного виробництва із застосуванням камер шокової заморозки, одна з найбільш доцільних. Така технологія використовується при роботі з продуктами середнього і великого розміру. Устаткування цього класу показує найбільший ефект при відносно невеликих обсягах продукції.

Тунельні камери являють собою горизонтально орієнтовані холодильно-морозильні конвеєри. Вони призначені для виробництва продуктів шокової заморозки в промислових масштабах, або для використання у великих гастрономічних торговельних мережах і в гіпермаркетах. Це обладнання має другу назву — шок-фрізери лінійного типу. Стрічка конвеєра проходить всередині камери, розділеної на кілька температурних зон. Кожна зона має свої випарники і вентилятори.

Тунельні камери передбачають безперервне використання їх протягом значних періодів (до декількох діб). Тому, корпуси і двигуни силових агрегатів винесені назовні за межі камери, що полегшує доступ до них технічних служб. Іноді компресори та вентилятори дублюються для можливості ремонту без зупинки лінії.

Для самоочищення конвеєрних стрічок і попередження наморожування конденсованого повітря в робочих зонах передбачаються спеціальні заходи.

Тунельні камери з використанням рідкого азоту в якості холодоагенту вимагають більш витратних технічних рішень. Однак, у ряді випадків криогенні агрегати допомагають заощадити кошти за рахунок значного скорочення необхідної площі цеху або ділянки.

Спіральні камери оснащуються циліндричними камерами, розташованими вертикально. Усередині циліндрів монтуються конвеєри спіральної форми. На відміну від тунельної шокової заморозки, фізичні параметри обробки в спіральних камерах постійні на всіх ділянках конвеєра — від завантаження до вивантаження продукції.

Сучасні машини цього типу оснащені системами антинаморожування і оперативного очищення, що дозволяє збільшувати цикл безперервної роботи до 14 діб.

Енергоефективність можна визначити як можливість отримання більшої віддачі від роботи обладнання при менших енерговитратах.

Можна виділити такі способи підвищення енергоефективності систем холодопостачання:

- застосування сучасного енергоефективного обладнання, в тому числі з маркуванням відповідності ERP (Ecodesign 2009 / 125 / EC);
- застосування технології для зміни температури кипіння холодоагенту VRT;
- застосування чілерів з удосконаленими конструкціями компресорів, переважно безмасляного типу;
- застосування мікроканальних теплообмінників;
- застосування VVR технології змінного ступеня стиснення холодоагенту;
- застосування IDV технології з проміжним випускним клапаном;
- застосування VPF систем зі змінною витратою води на випарнику;
- застосування систем з розширеними опціями обладнання холодильних машин (функціями фрікулінга, часткової та повної рекуперації скидного тепла, тощо);

— удосконалення принципів схем холодопостачання будівель (рівні резервування, відмова від проміжного гликолевого контуру, зрошувані градирні, рекуперація тепла / холоду тощо);

— оптимізація алгоритмів управління обладнанням (вибір параметрів регулювання, змінну витрату холодоносія тощо);

— зниження встановленої потужності системи холодопостачання завдяки коректному обліку сезонної динаміки зміни зовнішнього клімату і акумулюючої здатності конструкцій будівлі;

— застосування вдосконалених систем акумуляції холоду (технології «Cristopia» та ін.);

— зниження потреби в холоді центральних кондиціонерів застосуванням непрямого випарного охолодження і систем утилізації холоду в роторних абсорбційних теплообмінниках;

— рекуперація тепла конденсатора холодильної машини, що може бути виконана шляхом додаткового опціонального оснащення. Рекуперація може бути реалізована при різних схемах холодильного центру (повітряохолоджуючий конденсатор, водоохолоджуючий конденсатор, проміжний теплообмінник та ін.).

Висновки. Визначено, що інтегральним показником енергоефективності камер є споживання холоду за одиницю часу на тонну продукції. Споживання електроенергії на вироблення холоду залежить від температурних режимів в камерах. Відповідно до відомих термодинамічних характеристик холодильних машин, зі зниженням температури в камерах питомі витрати електроенергії на вироблення холоду зростають. Однак цей очевидний фактор зміни енергоемності вироблення холоду слід враховувати лише при суттєвих коливаннях температури камер певного цільового призначення. Для реальних виробничих умов вихідною базою енергетично-економічного аналізу роботи холодильних камер є теплові баланси. Баланси теплонадходжень можуть бути отримані трьома способами: розрахунковим, дослідним та дослідно-аналітичним.

Виявлено, що основним етапом енергетично-економічного аналізу є розробка математичних та багатофакторних кореляційних моделей енергетичних характеристик холодильних камер, які визначають залежність питомих витрат холоду (або електроенергії) на холодильну обробку продукції від основних «динамічних» параметрів їх експлуатації.

Запропоновано для використання шокову заморозку, як оптимальний з точки зору енергетичних витрат спосіб виробництва заморожуваних продуктів харчування.

Проведено аналіз та добір обладнання для виробництва заморожуваних продуктів харчування, оптимального за критерієм енергоефективності.

Розглянуто основні завдання оперативного управління компресорними холодильними установками, принципи побудови системи управління на основі діагностики режимів роботи обладнання та вибрано стратегію управління компресорними установками з урахуванням нелінійних параметрів процесів холодозабезпечення холодильних камер.

Список літератури

1. Остапенко О. В., Зімін О. В., Подмазко І. О., Хмельнюк М. Г. Шляхи підвищення енергоефективності холодильної установки підприємства харчової промисловості. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. № 52 (6). С. 4–10. doi: 10.15673/ret.v52i6.464.

2. Подмазко І. О. Підвищення ефективності роботи холодильного устаткування при термообробці харчових продуктів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.14 «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування» / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса : ОНАХТ, 2013. 20 с.

3. Грищенко В. О. Типові технологічні процеси і холодильне обладнання для зберігання рослинної продукції: моделювання, динамічні режими, керування : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2018. 248 с.

4. Омельченко О. В., Цвіркун Л. О., Ларін О. О. Моделювання холодильного обладнання для зберігання плодово-овочевої сировини. *Обладнання та технології харчових виробництв*. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. Вип. 2 (43). С. 131–138. doi : 10.33274/2079-4827-2021-43-2-131-138.

5. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Петрушина Ю. М., Расчехмаров І. В. Удосконалення систем контролю та керування процесом заморожування продукції в холодильних камерах промислових холодильників. *Вісник ХНУ. Серія «Технічні науки»*. 2022. Вип. 1 (305). С. 247–255. doi: 10.31891/2307-5732-2022-305-1-247-255.

6. Хорольський В. П., Омельченко О. В., Коренець Ю. М., Гончаренко В. А., Петрушина Ю. М. Холодозабезпечення холодильних камер смарт-промислових холодильників із системами нейро-нечіткого керування процесами заморожування продуктів харчування. *Вісник ХНУ. Серія «Технічні науки»*. 2021. Вип. 6 (303). С. 264–271. doi: 10.31891/2307-5732-2021-303-6-264-271.

7. Котов Б. І., Грищенко В. О. Моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери та структури системи автоматичного керування (САК) температурно-вологісним режимом. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2010. Вип. 39. С. 62–67.

8. Єрмілова Н. В., Кислиця С. Г., Тарасюк Р. М. Розроблення автоматизованої системи керування обладнанням овочесховища на базі нечітких нейронних мереж. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Вип. 1 (53). С. 50–54.

9. Грищенко В. О. Автоматизація процесу керування холодильним обладнанням в плодовоовочесховищах: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.07. Київ, 2016. 212 с.

10. Automatic controls for industrial refrigeration systems. Retrieved from: <https://web.fe.up.pt/~ee99259/projecto/conteudo%20teorico/artigos/Automatic%20Controls%20for%20Industrial%20Refrigeration%20Systems.pdf>.

11. Бесараб О. М., Біляєв В. Л. Керування збудженням синхронних двигунів з метою зниження перетоків реактивної потужності та сплати за них. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2006. Вип. 66. С. 335–336.

References

1. Ostapenko, O. V., Zimin, O. V., Podmazko, I. O., Khmelniuk, M. G. (2016). *Shliakhy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti kholodylnoi ustanovky pidpriemstva kharchovoi promyslovosti* [Power efficiency opportunities for industrial refrigeration system of food processing enterprise]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia* [Refrigeration Engineering and Technology], no. 52(6), pp. 4–10. doi: 10.15673/ret.v52i6.464.

2. Podmazko, I. O. *Pidvyshchennia efektyvnosti roboty kholodylnoho ustatkuvannia pry termoobrobtsi kharchovykh produktiv* [Increase of efficiency of work of refrigeration equipment during heat treatment of food products]. Odesa, ONAFT, 2013, 20 p.

3. Hryshchenko, V. O. *Typovi tekhnolohichni protsesy i kholodylne obladnannia dlia zberihannia roslynnoi produktsii: modeliuвання, dynamichni rezhymy, keruvannia* [Typical technological processes and refrigeration equipment for storage of plant products: modeling, dynamic modes, control]. Kyiv, Komprint Publ, 248 p.

4. Omelchenko, O. V., Tsvirkun L. A., Larin, O. O. (2021). *Modeliuвання kholodylnoho obladnannia dlia zberihannia plodovoovochevoi syrovyny* [Simulation of a refrigeration installation for fruit and vegetable raw materials]. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv* [Food production equipment and technologies], 2(43), 131–138. doi : 10.33274/2079-4827-2021-43-2-131-138.

5. Khorolskyi, V. P., Korenets, Yu. M., Petrushyna, Yu. M., Raschekhmarov, I. V. (2022). *Udoskonalennia system kontroliu ta keruvannia protsesom zamorozhuvannia produktsii v kholodylnykh kamerakh promyslovykh kholodylnykh* [Improvement of systems for monitoring and controlling the process of freezing products in refrigerating chambers of industrial refrigerators]. *Visnyk KhNU. Seriiia «Tekhnichni nauky»* [Bulletin of KhNU. Series «Technical Sciences»], 1(305), pp. 247–255. doi: 10.31891/2307-5732-2022-305-1-247-255.

6. Khorolskyi, V. P., Omelchenko, O. V., Korenets, Yu. M., Honcharenko, V. A., Petrushyna, Yu. M. (2021). *Kholodozabezpechennia kholodylnykh kamer smart-promyslovykh kholodylnykh iz systematy neuro-nechitkoho keruvannia protsesamy zamorozhuvannia produktiv kharchuvannia* [Cold safety of refrigerating chambers of smart industrial refrigerators from

unexpected neuro-fuzzy curing by the processes of freezing foodstuffs], *Visnyk KhNU. Seriya "Tekhnichni nauky"* [Bulletin of KhNU. Series "Technical Sciences"], no. 6(303), pp. 264–271. doi: 10.31891/2307-5732-2021-303-6-264-271.

7. Kotov, B.I., Grishchenko, V.O. (2010). *Modelyuvannya perekhidnykh rezhymiv obladnannya kholodylnoyi kamery ta struktury systemy avtomatychnoho keruvannya (SAK) temperaturno-volohisnym rezhymom* [Modeling of transient modes of refrigeration chamber equipment and structure of automatic control system (ACS) by temperature-humidity mode]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn* [Design, manufacture and operation of agricultural machinery], no. 39, pp. 62–67.

8. Ermilova, N. V., Kislytsia, S. G., Tarasyuk, R. M. (2019). *Rozroblennya avtomatyzovanoyi systemy keruvannya obladnanniam ovocheskhovyshcha na bazi nechitkykh neyronnykh merezh* [Development of an automated control system for vegetable storage equipment based on fuzzy neural networks]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zviazku* [Control, navigation and communication systems], no. 1(53), pp. 50–54.

9. Grishchenko, V.O. (2016). *Avtomatyzatsiya protsesu keruvannya kholodylnym obladnanniam v plodoovochoeshkhovyshchakh* [Automation of refrigeration equipment management process in fruit and vegetable storages]. Kyiv, 212 p.

10. Automatic controls for industrial refrigeration systems. Retrieved from <https://web.fe.up.pt/~ee99259/projecto/conteudo%20teorico/artigos/Automatic%20Controls%20for%20Industrial%20Refrigeration%20Systems.pdf>.

11. Besarab, O. M., Biliaiev, V. L. (2006). *Keruvannia zbudzhenniam synkhronnykh dvyhuniv z metoiu znyzhennia peretokiv reaktyvnoi potuzhnosti ta splaty za nykh* [Controlling the excitation of synchronous motors in order to reduce reactive power flows and pay for them], *Elektromashynobuduvannia ta elektroobladnannia* [Electrical engineering and electrical equipment], issue 66, pp. 335–336.

Objective. *The purpose of this article is to find ways to improve the quality of cooling processes of cooling and freezing of food of different nature in conditions of limited parameters of the energy system.*

Methods. *The work uses the methods of technical diagnostics, system analysis, mathematical modeling, situational management, collection and processing of knowledge, decision theory, including the use of artificial intelligence tools.*

Results. *The article presents a mathematical model for creating energy-efficient refrigeration units, based on the theoretical studies carried out, a method for selecting technological equipment is developed and calculations of energy-efficient modes of operation of equipment for the production of chilled and frozen food products are presented, a methodology for the formation of diagnostic models for complex processes, phenomena, aggregates, based on the structuring of disorders according to common symptoms. The scientific novelty of the expected results lies in the development of an intelligent control system for an energy-efficient refrigeration plant using automation elements. It has been determined that the integral indicator of the energy efficiency of the chambers is the consumption of cold per unit of time per ton of products, and the initial basis for the energy and economic analysis of the operation of refrigerators in real production conditions is the heat balances that can be obtained by calculation, experimental and experimental-analytical methods. It was revealed that the main stage of the energy-economic analysis is the development of mathematical and multifactorial correlation models of the energy characteristics of refrigeration chambers, which determine the dependence of the specific costs of cold (or electricity) for the refrigeration treatment of products on the main dynamic parameters of their operation. The analysis and selection of the optimal equipment according to the criterion of energy efficiency in the production of frozen food was carried out. Blast freezers are defined as the energy-optimal equipment for freezing foodstuffs. The main tasks of operational control of compressor refrigeration units, the principles of building a control system based on the diagnostics of equipment operation modes are considered, and a strategy for controlling compressor units is selected taking into account the nonlinear parameters of the processes of refrigeration supply of refrigeration chambers.*

Keywords: *cooling, freezing, industrial refrigerator, compressor, refrigerating machine, energy efficiency, power consumption, synchronous motor, asynchronous motor, reactive power.*