

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЕНЕРГООЩАДНОГО РОЗВИТКУ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ ОВОЧЕСХОВИЩ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

І. О. Суходуб, кандидат технічних наук, доцент

Д. С. Ільченко, аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: d.ilchenko@kpi.ua

Анотація. Збереження свіжості та якості овочів є важливим завданням для аграріїв у всьому світі, включаючи Україну. На тлі зростання цін на енергоносії, енергоефективність систем зберігання овочів стає особливо актуальною. Тому сучасні технології зосереджуються на розробці енергоощадних інженерних рішень для овочесховищ, спрямованих на зменшення енерговитрат та екологічного впливу. Особливу увагу приділяють оптимізації умов зберігання, автоматизованим системам керування мікрокліматом та використанню відновлюваних джерел енергії.

У статті розглянуто сучасні тенденції та перспективи розвитку енергоефективних інженерних систем для овочесховищ в Україні та світі. Наголошено на важливості оптимізації мікроклімату для збереження продукції та мінімізації енергетичних витрат. Дослідження базується на аналізі наукових публікацій, нормативних документів та аналітичних даних щодо вентиляційних, холодильних систем та автоматизації мікроклімату овочесховищ. Проведено порівняльний аналіз традиційних та сучасних технологій зберігання, включаючи застосування чисельного моделювання гідроаеродинамічних процесів (CFD) для оцінки ефективності систем підтримки мікроклімату.

Визначено, що інтеграція відновлюваних джерел енергії (сонячних панелей, теплових насосів, систем акумуляції холоду) суттєво знижує енергоспоживання овочесховищ. Використання CFD-моделювання дозволяє оптимізувати параметри повітрообміну, температури та вологості, що сприяє зменшенню витрат продукції та оптимізації енергоспоживання. Аналіз сучасних технологій свідчить про зростаючу роль інтелектуальних систем керування мікрокліматом, що дозволяють автоматично регулювати параметри повітряного середовища та забезпечувати оптимальні умови для збереження овочів. Впровадження енергоефективних технологій зменшує операційні витрати та мінімізує екологічний вплив. Досліджено концептуальні підходи до підвищення ефективності зберігання овочів, що базуються на поєднанні CFD-моделювання, автоматизованих систем керування мікрокліматом та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Впровадження цих підходів сприятиме покращенню якості зберігання продукції, зниженню енергоспоживання та збільшенню економічної ефективності овочесховищ. Подальші дослідження у сфері CFD-моделювання є важливими для вдосконалення

технологій розподілу повітряних потоків, вологості та температури, що дозволить підвищити ефективність інженерних систем для зберігання овочів.

Ключові слова: *мікроклімат овочесховищ, інженерні системи овочесховищ, енергоефективність, CFD-моделювання, відновлювальні джерела енергії, вентиляція*

Актуальність. Проблема збереження свіжості та якості овочів протягом тривалого часу є актуальною для аграрного сектору багатьох країн світу, зокрема і для України. Щороку значні обсяги свіжозібраних овочів втрачаються через недосконалість систем зберігання. За оцінками, у розвинених країнах з ефективними післязбиральними технологіями втрата продукції на етапі від виробництва до реалізації становить від 5 до 25 %, а в країнах, що розвиваються, післязбиральні втрати можуть сягати до 50 % врожаю [1]. Це призводить до значних економічних збитків для виробників та обмежує доступність свіжих овочів для споживачів. Також у контексті постійного зростання цін на енергоносії особливої актуальності набуває питання енергоощадності систем підтримання мікроклімату овочесховищ. Тому на сучасному етапі розвитку технологій значна увага приділяється створенню енергоефективних інженерних систем для овочесховищ, які дозволяють знижувати експлуатаційні витрати та мінімізувати вплив на навколишнє середовище. У зв'язку з цим також особливої ваги набуває використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), інтеграція автоматизованих систем керування мікрокліматом, а також оптимізація розподілу температур, вологості та потоків повітря в середині камер зберігання овочів. Для вирішення цих проблем необхідні інвестиції в модернізацію інженерних систем овочесховищ та впровадження сучасних технологій. Це дозволить не лише зберегти якість продукції, а й знизити енергоспоживання, що в свою чергу сприятиме зменшенню негативного впливу на довкілля. Зокрема, широкі перспективи для оптимізації мікроклімату в овочесховищах відкриває застосування метода чисельного моделювання в гідроаеродинаміці.

Аналіз останніх джерел та публікацій. Нещодавні дослідження зосереджені на різних аспектах збереження овочів з урахуванням енергоефективності, зокрема оптимізація мікроклімату сховищ, впровадження інтелектуальних систем керування, використання ексергетичного аналізу для оцінки ефективності систем вентиляції та

кондиціонування. Значна увага приділяється інтеграції ВДЕ (сонячних панелей, теплових насосів, систем акумуляції холоду) в інженерні системи овочесховищ, що дозволяє суттєво знизити енергоспоживання. У рамках чисельного моделювання активно застосовується CFD-аналіз, який дає змогу досліджувати повітряні потоки, розподіл температури та вологості в овочесховищах. Останні роботи фокусуються на розробці моделей, що враховують вплив щільності укладки продукції, конструктивних особливостей вентиляційних систем та умов охолодження на якість зберігання.

Мета дослідження – аналіз сучасних технологій зберігання овочів, зосереджуючи увагу на енергоощадності систем мікроклімату овочесховищ. Особливий акцент зроблено на використанні CFD-моделювання для оптимізації розподілу кліматичних параметрів та інтеграцію відновлюваних джерел енергії для підвищення енергоефективності інженерних систем, збереження якості продукції та мінімізації екологічного впливу.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження базується на огляді та аналізі наукових публікацій, нормативних документів та аналітичних даних, присвячених інженерним системам для зберігання овочів. Основним завданням було виявлення сучасних енергоефективних тенденцій у використанні систем вентиляції та кондиціонування, а також автоматизації для забезпечення стабільного мікроклімату в овочесховищах. Був виконаний порівняльний аналіз традиційних і сучасних технологій зберігання, включаючи примусову вентиляцію та використання відновлюваних джерел енергії.

Значна увага приділялася методам моделювання, зокрема чисельному моделюванню тепломасообмінних і аеродинамічних процесів за допомогою CFD-моделювання. У статті розглядаються приклади використання CFD-моделювання для аналізу розподілу температур, вологості та потоків повітря в різних типах овочесховищ.

Для оцінки енергоефективності систем вентиляції та кондиціонування використовувалися дані експериментальних досліджень, представлених у наукових роботах. Результати аналізу дозволили сформулювати уявлення про сучасний стан

технологій зберігання овочів, визначити їхні недоліки та перспективи вдосконалення.

Результати досліджень та їх обговорення. Високоєфективні сучасні технології зберігання овочевої продукції ґрунтуються на розробленні механізмів впливу на обмін речовин у плодах за рахунок спеціальних режимів регулювання температури, вологості, газового складу повітря. Технологія зберігання овочів у свіжому вигляді є найбільш ефективною щодо витрат і втрат продовольчої цінності. Крім того, слід зважити й на здатність осінніх і зимових сортів овочів набувати стану зрілості після певного терміну зберігання у відповідних умовах [2]. Процеси старіння та деградації тканин овочів є незворотними, навіть за ідеальних умов зберігання. Всі овочі продовжують дихати після збору врожаю, дихання - це хімічний процес, за допомогою якого овочі перетворюють цукри та кисень на вуглекислий газ, воду, етилен і тепло [3]. Основна мета зберігання – це сповільнити процес старіння, спричинений диханням, втратою вологи та гниттям.

Способи зберігання свіжих овочів варіюються від традиційних методів, таких як використання траншей, підвалів та буртів, до сучасних технологій, що передбачають точне регулювання мікроклімату в сховищах. Традиційні методи зберігання в земляних спорудах, хоча і є енергоефективними, характеризуються дуже високими втратами продукції внаслідок нестабільності температурного режиму та високої відносної вологості. За таких умов щомісячні природні втрати можуть складати 5-10 % [4]. У роботі [5] автори порівнювали два методи зберігання цибулі: природну вентиляцію та примусову вентиляцію. Результати показали значні відмінності між двома методами у втраті цибулі та її захворюваності. За природної вентиляції середня втрата цибулі становила 23,74 % і м'яка гниль спостерігалась в 10,79 % продукції, тоді як примусова вентиляція призвела до меншої втрати в 10,24 %, а м'яку гниль виявили в 3,43 % продукції.

Одним з найважливіших факторів, що впливають на тривалість зберігання овочів, є температура. Низькі температури сповільнюють біохімічні процеси, які відбуваються в тканинах рослин. Вологість повітря також відіграє важливу роль у збереженні овочів. Занадто низька вологість може призвести до в'янення, а занадто

висока – до розвитку гнильних процесів. Також важливими фізіологічними факторами для покращення післязбиральної якості та подовження терміну зберігання овочів є інтенсивність дихання овочів та оптимальні концентрації O_2/CO_2 /етилену при зберіганні в модифікованій або контрольованій атмосфері [6].

Таблиця 1 містить оптимальні значення температури та вологості, рекомендовані для зберігання основних овочевих культур [2].

1. Оптимальні параметри мікроклімату для зберігання овочів[2]

Продукт	Оптимальна температура зберігання, °С	Відносна вологість повітря, %	Середній термін зберігання, днів	Точка кристалізації внутріклітинної води, °С
Картопля	2 ÷ 4	90 ÷ 95	270	- 1,3
Капуста	-0,5 ÷ 0	85 ÷ 95	90 ÷ 250	- 1,0
Морква	-1 ÷ 0	90 ÷ 95	180 ÷ 270	- 1,6
Буряк	0 ÷ 1	90 ÷ 95	180 ÷ 270	- 1,6
Редька	0	90 ÷ 95	90 ÷ 120	- 1,1
Огірки	8 ÷ 10	85 ÷ 95	10	- 0,6
Кабачки	0 ÷ 4	85 ÷ 90	15	- 0,7
Томати	1 ÷ 2	85 ÷ 90	15 ÷ 30	- 0,7
Перець	7 ÷ 10	85 ÷ 90	15 ÷ 30	- 1,5
Баклажани	7 ÷ 10	85 ÷ 90	10 ÷ 20	- 0,9
Цибуля	-0,5 ÷ 2	65 ÷ 75	180 ÷ 270	- 1,8
Часник	-1 ÷ 2	65 ÷ 75	120 ÷ 200	- 2,6

Для досягнення та підтримання необхідних параметрів мікроклімату наявність кондиціонування не достатньо, необхідна детально прорахована вентиляція, яка якісно просушує, охолоджує, нагріває овочі. Влаштування якісної вентиляційної системи в овочесховищі майже повністю усуває ризик поширення захворювань серед продукції, через застій в ній етилену та вуглекислого газу. Правильно організована вентиляція дозволяє знизити втрати продукції, зберегти її споживчі якості та продовжити термін реалізації. У той же час системи вентиляції та кондиціонування є значними споживачами енергії і вони суттєво впливають на загальну собівартість та енергоємність кінцевої продукції. Для підвищення рівня

енергоощадності овочесховищ, особливо в умовах енергетичної кризи, необхідно зважено підбирати оптимальні способи обробки повітря. Зробити сховища більш енергоефективними можна шляхом впровадження таких технологій та заходів:

- Застосування вентиляторів із високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) та частотних перетворювачів для регулювання швидкості обертання вентиляторів залежно від потреби.

- Розумна автоматизація: встановлення датчиків температури, вологості, концентрації CO₂ та використання інтелектуальних систем управління для аналізу даних і створення оптимальних режимів вентиляції.

- Інтеграція рекуператорів, які дозволяють повторно використовувати тепло/холод з відпрацьованого повітря, що значно знижує енергоспоживання на підігрівання або охолодження свіжого повітря.

- Поліпшення теплоізоляції стін, покрівлі, підлоги для зменшення втрат теплової енергії/холоду.

- Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонце, вітер і біомаса для забезпечення живлення інженерних системи зберігання овочів.

- Оптимізація повітряних потоків: розробка системи вентиляції з урахуванням розташування продукції, щоб забезпечити рівномірний розподіл повітря і уникнути "застійних зон".

Ці технології та заходи вимагають значних капітальних інвестицій, окрім останнього з наведених, оскільки оптимізацію повітряних потоків в овочесховищі можливо просто здійснити оптимальним розміщенням продукції по відношенню до вентиляторів та випарників. Експериментально визначити оптимальні процеси тепло-масообміну та руху повітря в приміщеннях зберігання овочів дуже важко, тому зазвичай для аналізу розподілу температур, вологи та швидкостей повітря у приміщеннях овочесховищ використовують моделювання процесів.

Протягом останніх 20 років спостерігається зростаючий інтерес до аналізу умов розподілу температур, вологості та повітряних потоків в системах зберігання овочів за допомогою метода чисельного моделювання в гідроаеродинаміці (CFD – Computational Fluid Dynamics). CFD-моделювання використовує метод скінченних

елементів для розв'язання диференціальних рівнянь аеродинаміки та теплофізики в часткових похідних. Чисельне моделювання дозволяє визначити значення швидкості, температури, вологості та тиску повітря в кожній точці приміщення, а також оцінити інші параметри, що впливають на мікроклімат у сховищі. Візуалізація результатів чисельного моделювання забезпечує комплексне уявлення про формування мікроклімату в овочесховищі, дозволяє наочно оцінити ефективність вибраної схеми вентиляції та розташування продукції, що зберігається. Програмний пакет ANSYS Fluent є широко застосовуваним інструментом для виконання CFD-обчислень, що базуються на рівняннях безперервності, імпульсу та енергії, і дає змогу аналізувати теплові потоки та тривимірні поля течії [7].

У дослідженні [8] розглядається можливість використання CFD-моделі для аналізу особливостей повітрообміну під впливом вентиляції та охолодження в камерах зберігання овочів. За допомогою CFD-моделювання дослідники оптимізували вентиляцію холодильних камер для зменшення споживання енергії. На рис. 1 зображені лінії потоку повітря, які автори отримали на CFD-моделі сховища для зберігання капусти.

Дослідники зазначають, що щільне укладання ящиків може обмежувати ефективність вентиляції, тому рекомендовано залишати проміжки шириною не менше 20 см між рядами ящиків для покращення циркуляції повітря. Розроблена CFD-модель виявилася ефективною для моделювання повітряних потоків у промислових холодильних камерах, надаючи вичерпну інформацію, яка може бути корисною для підвищення енергоефективності та покращення умов зберігання.

У роботі [9] була розроблена CFD-модель для прогнозування температурних і швидкісних полів у холодильній камері зберігання картоплі. Зокрема дослідниками була визначена та рекомендована оптимальна температура зберігання картоплі 3,6 °С. Автори даної статті провели валідацію розробленої моделі та відзначили дуже точні результати CFD обчислень порівняно з експериментальними даними.

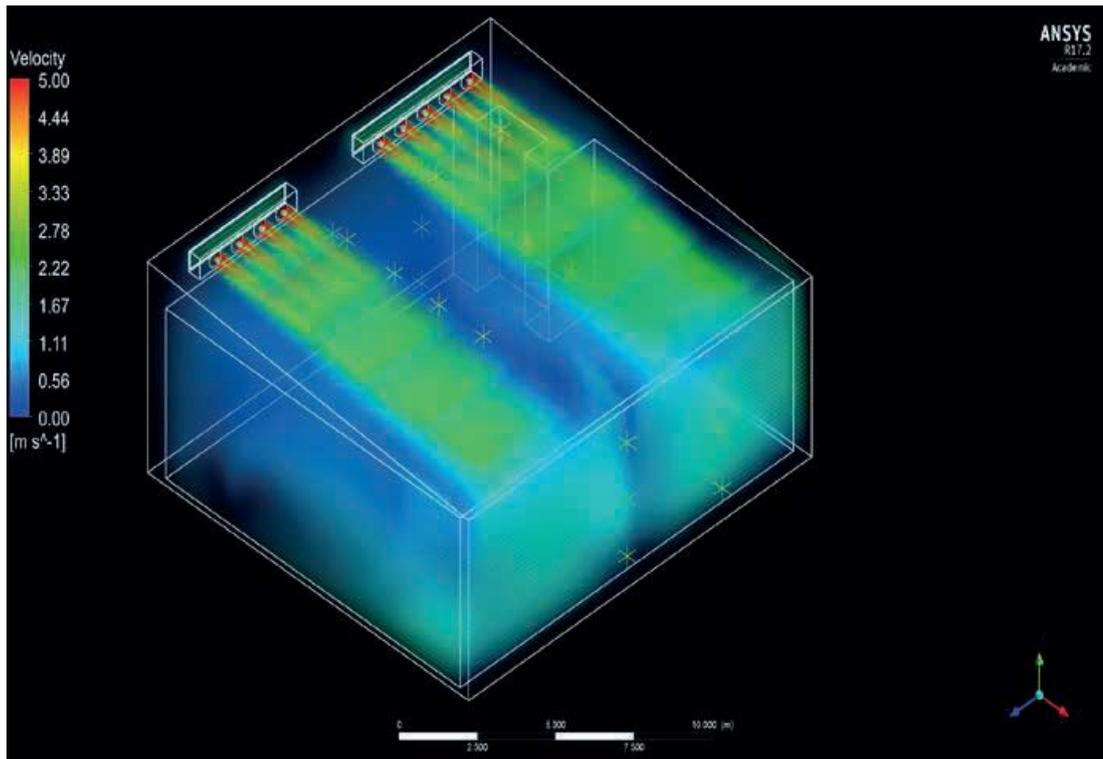


Рис. 1. 3D-вигляд ліній потоку при CFD-моделювання сховища [8]

У роботах [10, 11] автори за допомогою CFD-моделювання досліджують характеристики повітряного потоку в холодильних сховищах, а також властивості та розташування продукту, які дуже суттєво впливають на тепломасообмін всередині сховищ. Крім того, дослідження спрямовані на вдосконалення конструкції холодильних камер та розробку нових алгоритмів управління для оптимізації умов зберігання овочевої продукції, тим самим підвищуючи її якість та зменшуючи втрати продукції.

CFD-моделювання також може допомогти виявити розподіл вологи в овочесховищі шляхом детального аналізу процесів тепло- та масообміну, які впливають на рівень вологості в різних зонах сховища. Розрахунок розподілу температури дозволяє визначити зони можливого конденсації вологи або надмірного її випаровування, що безпосередньо впливає на мікроклімат. CFD-інструменти враховують джерела вологи, такі як випаровування овочів, і поглинання вологи матеріалами сховища, що допомагає створити точну карту розподілу вологості. Моделювання дає змогу виявити зони з надмірно високою або низькою вологістю, які можуть призводити до погіршення якості продукції,

утворення плісняви або гниття. У роботі [12] представлена та підтверджена повна CFD-модель, яка прогнозує швидкість зволоження та рівномірність розподілу вологості за різних умов. Автори спостерігали, що при не рівномірному розміщенню зволожувальних пристроїв різниця у вологості в межах камери може сягати 8,1 %, а отже є ризики втрати частини продукції, що зберігається.

CFD-моделювання також є ефективним інструментом для аналізу турбулентності та напрямку руху повітря в овочесховищі завдяки можливостям візуалізації та розрахунку складних потоків. CFD використовує математичні рівняння, такі як рівняння Нав'є-Стокса, для розрахунку параметрів повітряного потоку, включаючи швидкість, напрямок і тиск у тривимірному просторі. CFD-моделі включають алгоритми для моделювання турбулентності, наприклад, k - ϵ або k - ω моделей, які дозволяють точно оцінити її характеристики. Зокрема, в роботі [13] автори використовувалися CFD-симуляції для оцінки ефективності різних моделей турбулентності та підходів до моделювання граничного шару в холодильних камерах зберігання. Дослідники зазначають, що моделі турбулентності k - ϵ працювали недостатньо точно, особливо при високих числах Рейнольдса, а модель SST k - ω показала виняткову продуктивність з похибками нижче 5 %. Таким чином, CFD-моделювання забезпечує глибоке розуміння турбулентності та руху повітря, що дає змогу оптимізувати вентиляцію овочесховища, забезпечити рівномірність мікроклімату та зменшити ризики втрат продукції.

Енергоефективність зберігання овочів залежить не тільки від розподілу температур, вологості, потоків повітря, але й від оптимально підібраної тари або упаковки, яка може суттєво впливати на збереження овочів і зниження енергоспоживання. У роботах [14, 15] розглядаються ключові фактори розподілу повітряного потоку в упаковці, які впливають на ефективність охолодження. Автори зазначають значний вплив на охолодження продукції таких факторів: площі вентиляційних отворів, швидкості нагнітання повітря а також матеріалу пакування. Наприклад, оптимальна швидкість потоку повітря, визначена в дослідженнях, становить близько 0,4 м/с. Дослідники також вказують, що використання розмірів комірок на поверхні овочів в кілька міліметрів, типових для CFD досліджень

харчових продуктів, може негативно вплинути на точність, і насправді потрібні сітки з меншими розмірами комірок. До прикладу на рис. 2 зображений змодельований розподіл температури всередині вентиляльованої упаковки після 2 годин охолодження з початкової температури 21°C за допомогою повітря з швидкістю 0,3 м/с і температурою -5 °С.

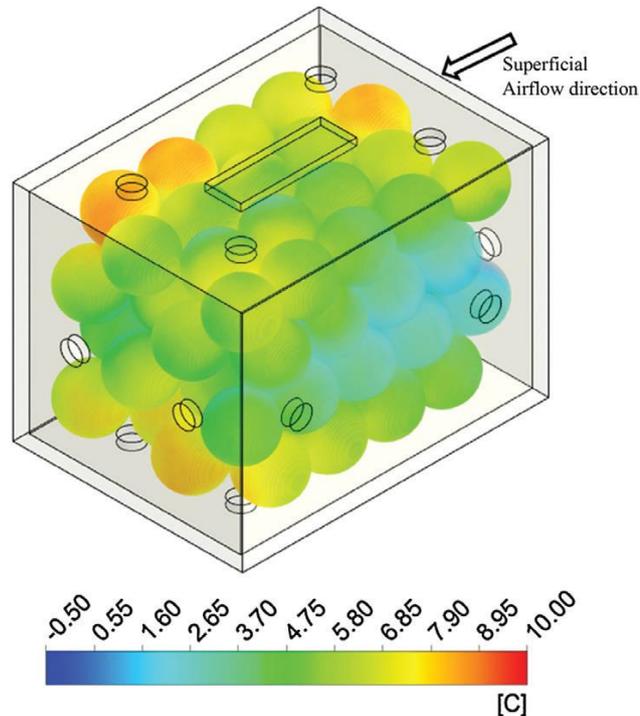


Рис. 2. Розподіл температури всередині вентиляльованої упаковки [15]

Нині в умовах енергетичної кризи сучасні інженерні системи відкривають широкі можливості для підвищення енергоефективності зберігання овочів, що є критично важливим для забезпечення продовольчої безпеки та економічної стабільності аграрного сектору. Системи вентиляції та кондиціонування є одними з найбільш енерговитратних елементів у сховищах, що робить питання підвищення їх енергоефективності особливо актуальним.

Сучасні технології дозволяють значно зменшити енергоспоживання вентиляційних та охолоджувальних систем завдяки використанню інверторних вентиляторів, адаптивного управління мікрокліматом, рекуперації тепла та природного охолодження (фрікулінгу). Енергоефективні рішення не тільки знижують витрати виробників, але й сприяють зменшенню викидів парникових газів та збереженню природних ресурсів.

Частотне регулювання вентиляторів і систем кондиціонування є одним із найбільш ефективних способів зниження енергоспоживання в овочесховищах. У дослідженні [16] автори зазначають, що зниження швидкості вентилятора на 20 % може скоротити енергоспоживання на 50 %. Це пояснюється нелінійною залежністю між швидкістю обертання вентилятора та споживаною потужністю. Впровадження інверторного регулювання вентиляторів та компресорами в овочесховища дозволяє забезпечити рівномірний температурний режим.

У роботі [17] досліджувалося, як різні умови вентиляції впливають на якість зберігання картоплі. Автори радять використовувати частотне регулювання вентиляторів, що дозволяє автоматично змінювати швидкість залежно від умов у сховищі. Також ними була рекомендована оптимальна витрата повітря, що дорівнює $1 \text{ м}^3/\text{хв}$ на 1 м^3 картоплі в режимі інтервальної вентиляції для балансу між енергоспоживанням та якістю зберігання.

Наступним важливим аспектом енергозбереження при зберіганні овочів є оптимізація роботи систем кондиціонування, яка передбачає застосування низькоенергетичних холодоагентів, інверторних компресорів, енергоефективних повітропроводів. А також використання теплових насосів, що можуть працювати в режимі як охолодження, так і нагріву, що дозволяє значно зменшити навантаження на традиційні холодильні установки та скоротити загальні витрати на енергоресурси. У роботі [18] досліджується потреба в енергоефективних системах зберігання холоду. Автори зазначають, що традиційні методи охолодження мають високий потенціал глобального потепління і поступово потрібно відмовлятися від них. У статті розглядаються альтернативні холодильні системи, які є більш екологічними та енергоефективними, такі як теплові насоси на CO_2 та вуглеводневі системи. Дослідження показують, що теплові насоси на CO_2 можуть заощадити 45-55 % енергії, яка витрачається на охолодження в сховищах зберігання овочів.

Комбінування технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), тепловізійний контроль та автоматизовані системи моніторингу, дозволяють досягти суттєвої економії енергії під час зберігання овочів. Зокрема, одним із перспективних підходів є впровадження термографії для моніторингу теплових потоків, що допомагає

виявити теплові втрати та нерівномірність розподілу кліматичних параметрів у сховищі. Згідно з дослідженням [19], тепловізійні технології дозволяють у режимі реального часу контролювати температуру та вологість у холодильних камерах та вентиляційних системах овочесховищ, а інтеграція ШІ-алгоритмів дозволяє автоматично налаштовувати системи охолодження та вентиляції залежно від умов зберігання. У роботі зазначається дуже перспективним використання згорткових нейронних мереж (CNN – Convolutional Neural Network) для обробки теплових зображень і автоматичного регулювання вентиляції залежно від температури продукції. Дослідники вказують на те, що використання ШІ-термографії дозволяє скоротити витрати електроенергії на охолодження до 25 % і в той же час знизити втрати продукції при зберіганні до 10-15 %. У подальшому впровадження подібних технологій стане невід'ємною частиною розвитку сучасних енергоощадних овочесховищ.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як біомаса, сонячна, вітрова та геотермальна енергетика в системи зберігання овочів є перспективним підходом до значного підвищення рівнів енергоощадності та енергонезалежності. Використання інноваційних технологій, що поєднують ВДЕ та сучасні системи керування енергоспоживанням, забезпечує стабільність роботи холодильних установок та вентиляції навіть у віддалених регіонах. Багато досліджень підкреслюють важливу роль відновлюваної енергетики в зберіганні овочів. У роботі [20] автори розглядають різні варіанти використання відновлюваних джерел енергії для підвищення енергоефективності в сільському господарстві, зокрема в системах зберігання овочів. Дослідники зазначають, що поєднання кількох ВДЕ (сонце + вітер + біогаз) разом із сучасними системами моніторингу дає змогу зменшити витрати енергії на 40-70 % в овочесховищах.

Використання сонячних панелей для живлення холодильних установок, вентиляційних систем та систем контролю мікроклімату дозволяє значно зменшити споживання традиційних енергоресурсів. Завдяки сучасним технологіям накопичення енергії та оптимізації процесів охолодження можливо забезпечити стабільне функціонування сховищ навіть у періоди низької сонячної активності. У

роботі [21] досліджується використання відновлювальної енергії, зокрема сонячної, для холодильного зберігання овочів. Автори зазначають, що в світі 30 % овочів псується через відсутність належного охолодження та вентиляції. Ці втрати в свою чергу збільшують кількість глобальних антропогенних викидів парникових газів, спричинених харчовими відходами до 8-10 %. Як відомо, холодильні та вентиляційні системи є значними споживачами електричної енергії, і фермери стикаються не тільки з проблемою високої початкової вартості установок, але й проблемою нестачі електричної потужності у віддалених регіонах. У цьому контексті ВДЕ частково, або навіть повністю може вирішити проблему нестачі потужності. Дослідниками було встановлено, що сонячні системи реально можуть зменшити енергоспоживання холодильних установок на 40–50 %. Також децентралізовані системи можуть забезпечити зберігання врожаю без підключення до електромережі, що важливо для віддалених регіонів.

У роботі [22] автори дослідили можливість використання випарного охолодження (Evaporative Cooling Chamber, ECC), яке отримує живлення від сонячної енергії, для підвищення ефективності зберігання овочів та зменшення втрат після збору врожаю. Дослідники стверджують, що випарне охолодження знижує температуру на 14,9-17,0 °С порівняно з навколишнім середовищем при отриманні живлення від сонячних фотовольтаїчних панелей і одночасно підвищує відносну вологість всередині ECC до 70,1 %. Наприклад, огірки та томати за допомогою ECC з сонячними панелями зберігаються 11 днів замість 5 днів зберігання в природніх умовах.

У роботі [23] досліджується можливість підвищення енергоефективності зберігання овочів шляхом інтеграції сонячних параболічних лоткових колекторів та акумульованого теплового накопичувача на основі матеріалів фазового переходу (Phase Change Material, PCM) з абсорбційною холодильною системою (Vapour Absorption Refrigeration, VAR). Автори стверджують, що в холодильній камері, місткістю 10 тон можна підтримувати температуру 6 °С для зберігання овочів, в якій накопичувач PCM, що заряджається сонячною батареєю, забезпечує роботу системи VAR протягом всієї доби. Необхідна маса PCM становить 12,5 тон, з п'ятьма

модулями параболічних сонячних колекторів загальною площею 150 м². Дослідники зазначають при цьому зниження енергоспоживання на 30-50 % порівняно з традиційними холодильними системами. І що в регіонах із високою сонячною активністю інтеграція VAR-системи, сонячних колекторів і PCM може стати найефективнішим рішенням для охолодження овочесховищ із мінімальними витратами електроенергії.

Використання PCM для зберігання овочів почало активно розвиватися в останні десятиліття, у поєднанні з ВДЕ вони дозволяють створювати автономні та економічні системи зберігання овочів. У роботі [24] автори досліджували використання PCM для акумуляції та збереження холоду в процесі зберігання овочів, а також розглядали комбінацію PCM з ВДЕ. Автори стверджують, що в експериментальному холодильному сховищі з використанням PCM температура всередині залишалася в межах 0–5 °С протягом 35 годин без активного охолодження, що дозволило суттєво зменшити споживання електроенергії.

Висновки і перспективи. У цій роботі був проведений аналіз сучасних методів зберігання овочів з акцентом на енергоефективність та оптимізацію мікрокліматичних параметрів овочесховищ. Досліджено основні методи забезпечення оптимальних умов зберігання, включаючи використання вентиляції, охолодження, автоматизованих систем керування. Також увагу приділено інтеграції ВДЕ, які дозволяють значно знизити енергоспоживання інженерних систем. Розглянуто можливості застосування CFD-моделювання для аналізу повітряних потоків та розподілу температури й вологи в овочесховищах.

Незважаючи на значний прогрес у застосуванні CFD-технологій у світі, в Україні цей напрямок залишається недостатньо дослідженим. Більшість наукових робіт базуються на закордонному досвіді, що потребує адаптації до місцевих кліматичних умов, конструктивних особливостей сховищ та доступних технологічних рішень. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку та впровадження CFD-моделей, які враховують специфіку українських овочесховищ, з метою підвищення їх енергоефективності та покращення якості збереженої продукції.

Список використаних джерел

1. Прісс О. П., Калитка В. В. Скорочення втрат під час зберігання овочів, чутливих до низьких температур. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2014. № 1. с.209-221.
2. Чередниченко В.М., Чередниченко Л.І. Технології зберігання плодів, овочів і картоплі: Навчальний посібник. Вінниця: Видавничий центр Вінницького національного аграрного університету. 2010. 115 с.
3. Khan, F. A., Bhat, S. A., & Narayan, S. Storage methods for fruits and vegetables. *Sher-e-Kashmir University of Agricultural Sciences and Technology of Kashmir. Shalimar*. 2017. P. 1-9.
4. Котко Я. М. Роль сховищ для зберігання продукції овочівництва. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2015. № 161. с.195-203.
5. Dabhi M., Patel N. Effect of Storage Ventilation on Bulb Disease of Onion. *Advances in Food Science and Engineering*. 2017. Vol. 1, No. 3, P. 100-106. DOI: <https://doi.org/10.22606/afse.2017.13002>
6. Raju P. S., Chauhan O. P., Bawa, A. S. Postharvest handling systems and storage of vegetables. *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing, Second Edition*, 2018. P. 247-264. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119098935.ch10>
7. Дешко, В. І., Суходуб, І. О., Яценко, О. І. Дослідження коефіцієнтів ефективності підсистеми тепловіддачі на основі CDF-моделі кімнати. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 5. с.17-24 DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.2>
8. Scaar H., Praeger U., Gottschalk K., Jedermann R., Geyer, M. Experimental and numerical analysis of airflow in fruit and vegetable cold stores. *Landtechnik*, 2017 Vol. 72, No. 1, P. 1-12. DOI: [10.15150/lt.2017.3148](https://doi.org/10.15150/lt.2017.3148)
9. Majed Z. A., Flamarz S. A. Evaluation, Monitoring, and Improving the Airflow and Heat Transfer in a Cold Storage of Foodstuffs, CFD Simulation and Experimental Investigation. *Sulaimania Journal for Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10, No. 1, P. 24-48. DOI: <https://doi.org/10.17656/sjes.10165>
10. De Baerdemaeker J., Delele M. A., Verboven P., Nicolai B. M. Multiscale modelling of postharvest storage of fruit and vegetables in a plant factory context. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011. Vol. 44, No. 1, P. 616-620. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02886>
11. Duret S., Hoang H. M., Flick D., Laguerre O. Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products. *International journal of refrigeration*. 2014. Vol. 46 P. 17-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.008>
12. Guo J., Wei X., Li B., Cao Y., Han J., Yang X., Lü E. Characteristic analysis of humidity control in a fresh-keeping container using CFD model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 179, P. 105816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105816>
13. Defraeye T., Verboven P., Nicolai B. CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: Turbulence and boundary-layer modelling. *Journal of Food Engineering*. 2013. Vol. 114, No. 4, P. 495-504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.09.003>

14. Cao Y., Gong Y. F., Zhang X. R. Impact of ventilation design on the precooling effectiveness of horticultural produce—a review. *Food Quality and Safety*. 2020. Vol. 4, No. 1, P. 29-40. DOI: <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyaa004>
15. Delele M. A., Ngcobo M. E. K., Getahun S. T., Chen L., Mellmann J., Opara U. L. Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part I: Model development and validation. *Postharvest Biology and Technology*. 2013. Vol. 86, P. 536-545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.014>
16. Літовко Б. М., Лідер М. Ю. Аналіз способів підвищення енергоефективності систем вентиляції і кондиціонування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 1. с.47-55. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-47-55>
17. Emragi E., Sathuvalli V., Jayanty S. S. The impact of ventilation conditions on the quality of Rio Grande Russet tubers during long-term cold storage. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2021. Vol. 3, P. 100095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100095>
18. Indergård E., Thomsen M. G., Heltoft P., Asalf B., Nordskog B., Widell K. N., Larsen, H. Industrial storage of root vegetables: Energy and quality aspects of existing cold-storages. In *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration. Montréal, Canada, August*. 2019. P. 24-30. DOI: [10.18462/iir.icr.2019.950](https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.950)
19. Pathmanaban P., Gnanavel B. K., Anandan S. S., Sathiyamurthy S. Advancing post-harvest fruit handling through AI-based thermal imaging: applications, challenges, and future trends. *Discover Food*. 2023. Vol. 3. No. 27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-023-00068-2>
20. Majeed Y., Khan M. U., Waseem M., Zahid U., Mahmood F., Majeed F., Raza A. Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*. 2023. Vol. 10, P. 344-359. DOI: [10.1016/j.egy.2023.06.032](https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.032)
21. Amjad W., Munir A., Akram F., Parmar A., Precoppe M., Asghar F., Mahmood F. Decentralized solar-powered cooling systems for fresh fruit and vegetables to reduce post-harvest losses in developing regions: a review. *Clean Energy*. 2023. Vol. 7, No. 3, P. 635-653. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/zkad015>
22. Patel D. P., Jain S. K. Development and performance evaluation of a portable solar-assisted evaporative cool chamber for preservation of perishables. *Journal of Food Process Engineering*. 2024. Vol. 47, No. 8, P. 14716. DOI: [10.1111/jfpe.14716](https://doi.org/10.1111/jfpe.14716)
23. Awasthi R., Chattopadhyay S., Ghosh S. Integration of solar charged PCM storage with VAR system for low capacity vegetable cold storage. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1240, No. 1, p. 012070. DOI: [10.1088/1742-6596/1240/1/012070](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012070)
24. Xiang B., & Zhang X. Advancements in the development of field precooling of fruits and vegetables with/without phase change materials. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 73, P. 109007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109007>

References

1. Priss, O. P., & Kalitka, V. V. (2014). Reduction of losses during storage vegetables sensitive to low temperatures. *Progressive Technique and Technologies of Food Production Enterprises, Catering Business and Trade*, (1), 209-221.
2. Cherednychenko, V.M., Cherednychenko, L.I. (2010). Technologies of storage of fruits, vegetables and potatoes: Educational book. Vinnytsia: Publishing Centre of Vinnytsia National Agriculture University. 115 с.
3. Khan, F. A., Bhat, S. A., & Narayan, S. (2017). Storage methods for fruits and vegetables. *Sher-e-Kashmir University of Agricultural Sciences and Technology of Kashmir. Shalimar*, 1-9.
4. Kotko Y.M. (2015). Role storage facility products horticulture. *Visnyk of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, (161), 195-203.
5. Dabhi, M., & Patel, N. (2017). Effect of storage ventilation on bulb disease of onion. *Advances in Food Science and Engineering*, 1(3), 100-106. DOI: <https://doi.org/10.22606/afse.2017.13002>
6. Raju, P. S., Chauhan, O. P., & Bawa, A. S. (2018). Postharvest handling systems and storage of vegetables. *Handbook of vegetables and vegetable processing, Second Edition*, 247-264. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119098935.ch10>
7. Dешко, V. I., Sukhodub, I. O., Yatsenko, O. I. (2022). Study of part efficiencies of the heat emission system using room CDF-model. *Technologies and engineering*. (5), 17-26. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.2>
8. Scaar, H., Praeger, U., Gottschalk, K., Jedermann, R., & Geyer, M. (2017). Experimental and numerical analysis of airflow in fruit and vegetable cold stores. *Landtechnik*, 72(1), 1-12. DOI:10.15150/lt.2017.3148
9. Majed, Z. A., & Flamarz, S. A. (2023). Evaluation, Monitoring, and Improving the Airflow and Heat Transfer in a Cold Storage of Foodstuffs, CFD Simulation and Experimental Investigation. *Sulaimania Journal for Engineering Sciences*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.17656/sjes.10165>
10. De Baerdemaeker, J., Delele, M. A., Verboven, P., & Nicolaï, B. M. (2011). Multiscale modelling of postharvest storage of fruit and vegetables in a plant factory context. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 616-620. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02886>
11. Duret, S., Hoang, H. M., Flick, D., & Laguerre, O. (2014). Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products. *International journal of refrigeration*, 46, 17-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.008>
12. Guo, J., Wei, X., Li, B., Cao, Y., Han, J., Yang, X., & Lü, E. (2020). Characteristic analysis of humidity control in a fresh-keeping container using CFD model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105816>
13. Defraeye, T., Verboven, P., & Nicolai, B. (2013). CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: Turbulence and boundary-layer modelling. *Journal of Food Engineering*, 114(4), 495-504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.09.003>

14. Cao, Y., Gong, Y. F., & Zhang, X. R. (2020). Impact of ventilation design on the precooling effectiveness of horticultural produce — a review. *Food Quality and Safety*, 4(1), 29-40. DOI: <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyaa004>
15. Delele, M. A., Ngcobo, M. E. K., Getahun, S. T., Chen, L., Mellmann, J., & Opara, U. L. (2013). Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part I: Model development and validation. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 536-545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.014>
16. Літовко, Б. М., & Лідер, М. Ю. (2021). Analysis of Ways to Increase Energy Efficiency of Ventilation and Air Conditioning Systems. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, (4), 47-55. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-47-55>
17. Emragi, E., Sathuvalli, V., & Jayanty, S. S. (2021). The impact of ventilation conditions on the quality of Rio Grande Russet tubers during long-term cold storage. *Journal of Agriculture and Food Research*, 3, 100095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100095>
18. Indergård, E., Thomsen, M. G., Heltoft, P., Asalf, B., Nordskog, B., Widell, K. N., & Larsen, H. (2019). Industrial storage of root vegetables: Energy and quality aspects of existing cold-storages. In *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration. Montréal, Canada, August 24-30, 2019*. DOI: [10.18462/iir.icr.2019.950](https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.950)
19. Pathmanaban, P., Gnanavel, B. K., Anandan, S. S., & Sathiyamurthy, S. (2023). Advancing post-harvest fruit handling through AI-based thermal imaging: applications, challenges, and future trends. *Discover Food*, 3(1), 27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-023-00068-2>
20. Majeed, Y., Khan, M. U., Waseem, M., Zahid, U., Mahmood, F., Majeed, F., & Raza, A. (2023). Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 10, 344-359. DOI: [10.1016/j.egyr.2023.06.032](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.032)
21. Amjad, W., Munir, A., Akram, F., Parmar, A., Precoppe, M., Asghar, F., & Mahmood, F. (2023). Decentralized solar-powered cooling systems for fresh fruit and vegetables to reduce post-harvest losses in developing regions: a review. *Clean Energy*, 7(3), 635-653. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/zkad015>
22. Patel, D. P., & Jain, S. K. (2024). Development and performance evaluation of a portable solar-assisted evaporative cool chamber for preservation of perishables. *Journal of Food Process Engineering*, 47(8), 14716. DOI: [10.1111/jfpe.14716](https://doi.org/10.1111/jfpe.14716)
23. Awasthi, R., Chattopadhyay, S., & Ghosh, S. (2019). Integration of solar charged PCM storage with VAR system for low capacity vegetable cold storage. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1240, No. 1, p. 012070. DOI: [10.1088/1742-6596/1240/1/012070](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012070)
24. Xiang, B., & Zhang, X. (2023). Advancements in the development of field precooling of fruits and vegetables with/without phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 73, 109007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109007>

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF ENERGY-SAVING DEVELOPMENT OF VEGETABLE STORAGE ENGINEERING SYSTEMS IN UKRAINE AND THE WORLD

I. Sukhodub, D. Ilchenko

Abstract. *Preserving the freshness and quality of vegetables is an important task for farmers worldwide, including Ukraine. Amid rising energy prices, the energy efficiency of vegetable storage systems is becoming especially important. Therefore, modern technologies focus on the development of energy-saving technical solutions for vegetable storage facilities aimed at reducing energy consumption and environmental impact. Particular attention is paid to the use of renewable energy sources, automated microclimate control systems and optimization of storage conditions.*

The paper discusses current trends and prospects for the development of energy-efficient technical systems for vegetable storage facilities in Ukraine and the world. The importance of microclimate optimization for product preservation and minimization of energy costs is emphasized. The study is based on the analysis of scientific publications, regulatory documents and analytical data on ventilation, air conditioning systems and microclimate automation of vegetable storage facilities. A comparative analysis of traditional and modern storage technologies was carried out, including the use of computational fluid dynamics modelling (CFD) to assess the effectiveness of microclimate maintenance systems.

It has been identified that the integration of renewable energy sources (PV panels, heat pumps, cold storage systems) significantly reduces the energy consumption of vegetable storage facilities. The use of CFD modelling allows optimization of the parameters of air exchange, temperature and humidity, which helps to reduce product losses. An analysis of modern technologies shows the growing role of intelligent microclimate control systems that automatically adjust the parameters of the air environment and provide optimal conditions for storing vegetables. The introduction of energy-efficient technologies reduces operating costs and minimizes environmental impact. Conceptual approaches to improving the efficiency of vegetable storage based on a combination of CFD modelling, automatic microclimate control systems, and integration of RES have been investigated. Implementation of these approaches will help improve the quality of product storage, reduce energy consumption, and increase the economic efficiency of vegetable storage facilities. Further research in CFD modelling is important to improve airflow, humidity, and temperature distribution technologies, which will increase the efficiency of technical storage systems.

Key words: *the microclimate of vegetable storage facilities, technical systems of vegetable storage facilities, energy efficiency, CFD modelling, renewable energy sources, ventilation*