

УДК 631.563:664.8.037.1

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ ЗБЕРІГАННІ ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА

Ломейко О.П., к.т.н.,

Єфіменко Л.В., аспірантка*

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. (097) 875-84-08, e-mail: emon175@rambler.ru

Анотація – у статті надається теоретичне дослідження використання технології вакуумного охолодження в процесі переробки сільськогосподарської продукції. Розглянуто переваги та недоліки методу та діапазон можливого застосування. Зроблено висновок, що подальші дослідження технології з метою впровадження в переробну промисловість України є доцільними.

Ключові слова – зберігання, охолодження, вакуумне охолодження, якість продукції, термін зберігання, швидкість охолодження, втрата ваги, овочі, вакуумний охолоджувач.

Постановка проблеми. Важливим елементом агропромислового комплексу України є галузі, які забезпечують зберігання та перероблення сільськогосподарської продукції. Від ступеня їх розвитку, технічного оснащення, досконалості економічних зв'язків з сільськогосподарським виробництвом, розміщення споживачів значною мірою залежить раціональне використання продукції рослинництва, рівень забезпеченості потреб населення у продуктах харчування. Вирішення продовольчої проблеми поряд з нарощуванням виробництва сільськогосподарської продукції залежить від збільшення виходу кінцевої продукції за рахунок впровадження прогресивних технологій зберігання та розвитку переробних галузей.

У теперішній час існує необхідність розробки й впровадження нових методів зберігання, а тим самим значного продовження терміну придатності продукції рослинництва. З метою продовження часу споживання свіжозібраних фруктів та овочів дуже важливими факторами є підтримка їх якості та затримка погіршення. Продовження процесу дихання після збору врожаю та зростання ферментного розпаду внаслідок діяльності мікроорганізмів, які залежать від зростання температури та присутності етилену, вважаються головними причинами біо-

Ломейко О. П., Єфіменко Л. В.

* Науковий керівник – к.т.н. Ломейко О. П.

деградації [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій у світі свідчить, що технологія вакуумного охолодження сільськогосподарської продукції є досить перспективним методом, який вважається одним із найважливіших кроків у ланцюгу післязбиральної переробки продукції з метою мінімізації втрати ваги, збільшення терміну зберігання та поліпшення якості продукції. Охолодження продуктів одразу після збирання є дуже важливим для запобігання погіршенню, яке зазвичай відбувається у фруктах та овочах у післязбиральний період. З метою зменшення втрати води, пожовтіння та в'янення температура зберігання свіжої продукції швидко знижується відразу після збирання врожаю [11].

Попереднє охолодження це спосіб видалення польової теплоти зі свіжозібраних фруктів та овочів. Використання методів попереднього охолодження дає змогу знизити втрату вологи та розширити термін придатності швидкопсувної продукції [3]. Попереднє охолодження зазвичай включає в себе використання таких трьох різних методів, примусове повітряне охолодження, гідроохолодження та вакуумне охолодження. Вибір методу залежить від характеристик продукції та доступних технологій.

Постановка завдання. Метою цієї статті є проведення теоретичного дослідження технології вакуумного охолодження, детальний розгляд переваг та недолік методу та діапазону його застосування для подальшого експериментального дослідження щодо можливого впровадження в переробну промисловість України.

Основна частина. Результати теоретичного дослідження свідчать, що вакуумне охолодження це швидкий ефективний метод випарного охолодження, який зазвичай використовується для продуктів, що мають пористу структуру та містять значну кількість вологи. Висока ефективність переробки досягається за рахунок скорочення часу охолодження. Останні дослідження показують також можливість застосування методу вакуумного охолодження для ковбасних виробів, рибної продукції та готових страв, для яких швидке охолодження є вигідним в плані контролю росту мікроорганізмів, що впливають на збереження якості продукції. Вакуумне охолодження базується на випаровуванні рідини, за рахунок чого досягається охолоджуючий ефект. Різниця між вакуумним охолодженням та традиційними методами охолодження полягає в тому, що при вакуумному охолодженні охолоджуючий ефект досягається випаровуванням певної кількості вологи безпосередньо з продукту [9].

Швидкість та ефективність – це дві особливості вакуумного охолодження, які дуже важко досягнути традиційними методами охолодження, особливо при охолодженні продукції в коробках чи піддонах. Вакуумне охолодження може застосовуватися для будь-якого

продукту, що містить вільну вологу, та структура якого не може бути пошкоджена видаленням цієї вологи. Швидкість та ефективність вакуумного охолодження досягається за рахунок різниці між площею поверхні та масою продукту.

Вакуумне охолодження успішно застосовується для видалення польового тепла з рослинної продукції США з 1950 року. Дослідження показали ефективність методу для попереднього охолодження певного типу свіжих овочів, таких як салат латук та гриби [2]. Вакуумне охолодження може значно знизити післязбиральне псування овочів, таким чином збільшуючи термін їх зберігання. З цією ж метою вакуумне охолодження також є ефективним методом попереднього охолодження продукції флористики [3]. Однак, якщо різниця між площею поверхні та масою продукту невелика, або існує ефективний бар'єр, що запобігає втраті вологи з поверхні продукту, процес вакуумного охолодження може значно уповільнитися. Така продукція, як томати, яблука, перець, тобто продукти, які мають відносно товсту воскову кутикулу, не придатні для охолодження вакуумом. Вакуумне охолодження було успішно застосоване в процесі переробки рідких та запечених продуктів, зменшення часу переробки дало змогу вдосконалити ефективність процесу та зменшити час розподілу до ринків. Нещодавно вакуумне охолодження було досліджене як ефективний метод охолодження для ковбасних виробів, в той час, як традиційні методи охолодження не можуть забезпечити настільки швидкого охолодження для цієї продукції [6].

Принцип вакуумного охолодження. В холодильній промисловості найчастіше використовується охолодження за рахунок випаровування рідини. Кожного разу, коли порція рідини випаровується, переходячи у стан пари, вона поглинає кількість тепла, що дорівнює прихованій теплоті випаровування, або з продукту, або ж з навколишнього середовища, призводячи до зниження температури відповідно чи продукту, чи навколишнього середовища [5]. Вода кипить при температурі 100°C та атмосферному тиску 1 атм (101325 Па). Проте зниження тиску призводить до зниження температури кипіння води, тобто вода може кипіти при температурі 0°C , якщо знизити тиск до 611 Па. Встановлений тиск визначає мінімальну температуру, яка може призвести до закипання води, що в свою чергу призводить до ефекту охолодження [6]. Якщо продукція, яка містить достатню кількість вологи та має пористу структуру, піддається вакуумному тиску, частина води зсередини продукту випаровується, призводячи до охолодження продукту до температури, яка відповідає вакуумному тиску. Як правило, більшість продуктів має дві основних складові: вода та тверда структура. Таким чином, холодоносієм, який використовується у вакуумному охолодженні не чиста вода, але одна зі складових про-

дукту.

Зниження температури на одиницю процентної втрати ваги ви- значається за формулою

$$\eta_T = \frac{\Delta T}{\Delta m_w / m_p} = \frac{h_{fg}}{c}, \quad (1)$$

де η_T – зниження температури на одиницю процентної втрати ваги, °С/1% втрати ваги;

ΔT – різниця температур, °С;

m_w, m_p – маса води та маса продукту відповідно, кг;

Δm – зміна маси, кг;

c – питома теплоємність, кДж/кг·К;

h_{fg} – прихована теплота, кДж/кг.

Як показано у рівнянні (1), питома теплоємність продукції ви- значається зниженням температури на одиницю процентної втрати ва- ги. В таблиці 1 наведено питому теплоємність та розраховані значення зниження температури для води та листових овочів [7].

Таблиця 1

Вологість, питома теплоємність та зниження температури на одиницю втрати ваги для чистої води та листових овочів

	Вологість, %	Питома теплоємність, с, Кдж/кг·°С	Зниження температури, η_T , °С/1% втрати ваги
Вода	100	4,2	6,0
Листові овочі	90	3,9	6,5

Типовий вакуумний охолоджувач. Оскільки продукцію, яка має пористу структуру та містить велику кількість вологи, може бути охолоджено безпосередньо випаровуванням води з середини продукту при низьких температурах під вакуумним тиском, вакуумний охолоджувач є дійсною системою для забезпечення потрібного тиску. Типовий вакуумний охолоджувач, який показано на рисунку 1, складається з двох основних компонентів: вакуумної камери та системи вакуумного відкачування [12]. Процес вакуумного охолодження відбувається в два етапи:

1) видалення більшості повітря в камері до точки загоряння або насиченого тиску при початковій температурі продукту з відносно невеликим охолодженням.

2) подальше зниження тиску у вакуумній камері до кінцевого значення тиску з основною фазою охолодження продукту.

Для утримання продукції використовується вакуумна камера, яка, як правило, горизонтальна, циліндричної або прямокутної конструкції. На протязі процесу охолодження двері камери герметично заблоковані, тому що будь-яке просочування повітря до вакуумного

охолоджувача збільшує навантаження системи вакуумної відкачки [8].



Рис. 1. Типовий вакуумний охолоджувач

Система вакуумної відкачки складається з двох елементів: вакуумного насоса та парового конденсатора. Вакуумний насос призначений для зменшення тиску у вакуумній камері з атмосферного тиску до тиску насиченої пари. У вакуумних охолоджувачах широко застосовується роторний масляний насос.

Необхідна швидкість відкачування може бути визначена за формулою

$$S = \frac{V_f}{t/3600} \ln \frac{P_0}{P_{fp}}, \quad (2)$$

де S – швидкість відкачування, $m^3/\text{год.}$;

t – час, с;

V_f – вільний об'єм камери, m^3 ;

P_0 , P_{fp} – початковий тиск, та тиск у точці загоряння відповідно, Па.

Пароконденсатор видаляє пару з вакуумної камери за рахунок конденсації пару назад у воду та подальшого дренажу. Однак необхідно зазначити, що оскільки ефект охолодження виникає за рахунок безпосереднього випаровування води з продукту, то пароконденсатор застосовується в вакуумному охолоджувачі з практичною і економічною метою видалення великої кількості згенерованої пари. Необхідність застосування вакуумного конденсатора у вакуумному охолоджувачі може бути підтверджена наступним прикладом.

Загальну кількість води, що випаровується, тобто втрату ваги продукту, може бути розраховано наступним чином

$$\Delta m_w = \frac{cm_p \Delta T}{h_{fg}}, \quad (3)$$

де Δm_w – втрата води, кг;

m_p – маса продукту, кг;

ΔT – різниця температур, $^{\circ}\text{C}$;

C – питома теплоємність, кДж/кг·К;

h_{fg} – прихована теплота, кДж/кг.

Якщо пару представити як ідеальний газ, об'єм пари, що розширюється завдяки випаровуванню води можна розрахувати за формулою

$$V = \frac{\Delta m_w}{M_w} \frac{RT_{K,vc}}{P_{vc}}, \quad (4)$$

де M_w – мольна маса води, кг/моль;

$T_{K,vc}$ – температура у вакуумній камері, К;

P_{vc} – тиск у вакуумній камері, Па;

R – універсальна газова стала, 8,314 Дж/кг·моль.

Якщо вакуумний охолоджувач використовується для охолодження 1000 кг овочів з температури 25°C до 5°, маса випареної води, розрахованої за формулою (3), становить близько 31кг. Таким чином загальний об'єм пари, розрахований за рівнянням (4) становить близько 4300 m^3 при температурі 25°C та тиску 1 кПа. Якщо час охолодження становить 30 хв, включаючи 5 хв для доведення тиску в камері до точки загоряння, і система герметична, швидкість відкачування повинна становити близько 10, 300 m^3 /год [6].

На практиці цієї мети досягнути важко за допомогою вакуумного насосу, та навіть групи вакуумних насосів. Проте, капітальна вартість вакуумного насосу значно зростає із зростанням його продуктивності.

Переваги та недоліки вакуумного охолодження. Головна перевага вакуумного охолодження це велика швидкість охолодження у порівнянні з традиційними методами охолодження. Для прикладу, експериментальні результати охолодження показують, що середня швидкість охолодження овочів, яка досягається вакуумним охолодженням, встановлює 0,5°C/хв, що в 60 разів вище, ніж при повільному повітряному охолодженні.

Умовою рівномірного та швидкого охолодження продукту є рівномірно розподілена пористість всередині продукту та упаковки. При вакуумному охолодженні вологої продукції не має різниці де індивідуальний продукт розташовано, в упаковці чи великому контейнері, тому що ефект охолодження досягається за рахунок випаровування вологи безпосередньо з окремих пор. В той час, як в холодильній камері, швидкість охолодження продукту може коливатися в межах 0,05-3°C/год в залежності від типу контейнера та типу розміщення продукції. При застосуванні примусового повітряного охолодження існує ризик пошкодження поверхні продукту через замерзання, в той час, як в середині продукт не охолоджується належним чином [7]. Тобто рівномірне охолодження продукції є перевагою вакуумного охолодження.

Вакуумне охолодження у порівнянні з повітряним охолодженням та гідро охолодженням вимагає найменших енергетичних затрат [4]. Це є наслідком того, що при вакуумному охолодженні немає потреби циркуляції холодоносія крізь систему, і вакуум мінімізує обмін теплотою з навколишнім середовищем. При вакуумному охолодженні салата латuca енерговитрати становлять приблизно 0,56 кВт для зниження температури на 1°C у порівнянні з 3,7 кВт на 1°C при гідро охолодженні.

Крім того, вакуумні охолоджувачі є дуже гігієнічними через обмежений контакт із повітрям, повітря заходить до контейнеру тільки коли контейнер відкривається для визволення вакууму. Майже будь який тип пакування придатний для вакуумного охолодження, за умови, що упаковка, яка вміщує продукт, є пористою або має отвори для можливості дихання. Ще одною перевагою є можливість точного температурного контролю на протязі процесу вакуумного охолодження. Температура продукту може бути доведена всередині до 1-3°C завдяки контролюванню абсолютного тиску [7].

Вакуумне охолодження також має свої недоліки. Наприклад, воно не може бути заміною встановлених традиційних технік заморожування. Крім того, на протязі процесу вакуумного охолодження відбувається втрата ваги продукту, яка у овочів становить приблизно 3-4% від попередньої ваги, але схожі втрати відбуваються також і при холодильному охолодженні. Тим не менш, в процесі вакуумного охолодження втрата ваги продуктом може бути зменшена за рахунок додавання відповідної кількості води. З цією метою у вакуумний охолоджувач інсталується водяний розприскувач [6]. Попередньо розрахований обсяг води додається до продукції, що пакується у водонепроникне ні пластикові мішки, вільні кінці яких затягуються, забезпечуючи вільне закриття. Упаковки з продукцією після цього встановлюються в палети та розміщуються у вакуумну камеру [10]. Попереднє зволоження продукції з метою зменшення втрати ваги продуктом проводиться також для абсорбування певної кількості води перед вакуумним охолодженням [12].

Застосування вакуумного охолодження для фруктів на овочів. Вакуумне охолодження було застосовано в промислових масштабах для охолодження салату айсберг в США та багатьох країнах Європи з метою швидкого охолодження та збільшення терміну придатності. Салат, який охолоджується на допомогу вакууму, обгортається в плівку ПВХ або перфоровані поліетиленові мішки. Вакуумне охолодження спроможне зменшити температуру з 25°C до 1°C менш ніж за 30 хв. Салат, який зберігається при температурі навколишнього середовища звичайно має термін придатності 3-5 днів, проте, вакуумне охолодження в поєднанні з холодильним зберіганням при температурі

1°C, призводить до збільшення терміну зберігання аж до 14 днів [6].

Попереднє охолодження грибів є ще одним важливим традиційним застосування вакуумного охолодження. Пориста структура та великий вміст вологі робить це можливим. Було показано, що перевага вакуумного охолодження була еквівалентна продовженому терміну зберігання в 24 год. після 102 год. зберігання.

Було також досліджено вплив вакуумного охолодження на якість грибів. Для грибів високої якості не було знайдено значної різниці між вакуумним та звичайним охолодженням, якщо гриби зберігались при температурі 5°C після охолодження. Однак, якщо були незначно погіршені перед охолодженням надавало несприятливий ефект за рахунок прискорення ферментативного потемніння шлярки грибів у зрівнянні зі звичайними методами охолодження, якщо продукт зберігався при температурі 1°C на протязі 8-10 днів. Ферментативне потемніння шлярки грибів викликане ферментом поліфенолоксидази це головний критерій якості грибів, однак, пакування подібного типу грибів до і після охолодження зменшує активність поліфенолоксидази і зменшує погіршення від потемніння. Вакуумне охолодження грибів також показало результат 3,6% втрати ваги, що було вище ніж 2% при повітряному охолодженні. Тим не менш, в період зберігання гриби, які охолоджувались під вакуумом, втратили менше вологи, ніж гриби, до яких застосовувалось повітряне охолодження, що отже допомогло компенсувати втрати при охолодженні. Попереднє зволоження грибів перед вакуумним охолодженням було продемонстроване як ефективний метод збільшення виходу продукту. Вакуумне охолодження було прийнято в промислових масштабах у США, Великобританії, Ірландії та інших частинах Європи та було застосоване для рівномірного охолодження грибів у штабелях [4].

Проводилася також робота з метою дослідити застосування вакуумного охолодження для інших сортів овочів та фруктів, включаючи броколі, шпинат, китайське листя, баклажани, огірки, моркву, перець, ріпу, полуницю, чорну смородину та диню. Загальні результати показали, що вакуумне охолодження є ефективним і дієвим методом охолодження для цих продуктів. Однак, взагалі кажучи, швидкість охолодження для не листових овочів та фруктів нижче, ніж для листових. Результати також показують, що звичайна втрата ваги 4% зустрічається при зниженні температури з 25°C до 1°C. Попереднє зволоження продуктів було також знайдено практичним методом компенсації втрат при охолодженні. В деяких випадках поглинання води може викликати збільшення чистої ваги після вакуумного охолодження. Деякі дослідження показали, що час інтервалу попереднього зволоження також впливає на втрату ваги [6].

Висновки. Вакуумне охолодження це швидка технологія охолодження для продукції, що має високу вологість та пористу структуру. Теплота з продукту видалається завдяки випаровуванню певної кількості води безпосередньо з середини продукту під вакуумним тиском. Втрата води по суті відбувається під час вакуумного охолодження, тому що ефект охолодження відбувається через випаровування води. Проте, втрату ваги у продукції можна зменшити або компенсувати завдяки додаванню певної кількості води перед вакуумним охолодженням. Розмір та форма продукту не оказує значного впливу на швидкість вакуумного охолодження, на відміну від традиційних методів охолодження, таких як повітряне охолодження, вентиляторне охолодження, гідроохолодження. Технологія широко застосовується для швидкого видалення польового тепла для продукції рослинництва та у флористиці. Крім того вона успішно застосовується у процесі переробки деяких рідких продуктів та хлібобулочних виробів, у м'ясопереробній індустрії. Застосування вакуумного охолодження є привабливим для харчової промисловості.

Так як вакуумне охолодження є інноваційною технологією, яка пропонує харчовій промисловості багато переваг, зокрема з точки зору зниження виробничих витрат та покращення якості продукту, очікується, що його використання буде більш конкурентоспроможним та широко поширеним у майбутньому.

Таким чином можна зробити висновок, що подальше дослідження вакуумного охолодження з метою впровадження технології в переробну промисловість України є доцільним.

Література

1. *Alibas I., Koksal N.* Convective, vacuum and microwave drying kinetics of mallow leaves and comparison of color and ascorbic acid values of three drying methods / *I. Alibas, N. Koksal.* – Food Science and Technology, 2014. – P. 358-364.

2 *Anon.* Vacuum cooling for fruits and vegetables / *Anon.* – Food Processing Industry, 1981. – P. 12- 24.

3 *Brosnan T., Sun D.-W.* Compensation for water loss in vacuum precooled cut lily flowers / *T. Brosnan, D.-W. Sun.* – Journal of Agricultural Engineering Research, 2001. – P. 299-305.

4 *Sun D.-W., Zheng L.* Vacuum cooling technology for the agri-food industry: past, present and future / *D.-W. Sun, L. Zheng.* – Journal of Food Engineering 77, 2006. – P. 203-214.

5 *Dostat R. J.* Principles of refrigeration (3rd ed.) / *R. J. Dostat.* – Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1991.

6 *Wang L., Sun D.-W.* Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology/ *L. Wang, D.-W. Sun.* – Trends in Food Science and Technology 12, 2001. – P. 174-184.

7 Longmore A.P. Vacuum cooling of food products / A.P.Longmore. – Chemical processing, 1971.

8 Malpas E.W. Vacuum equipment for evaporative cooling / E.W.Malpas. – Process Biochemistry, 1978. – P. 10, 15-17.

9 Mellor J.D. Vacuum techniques in the food industry/ J.D. Mellor. – Food Technology Australia, 1980. – P. 397-398.

10 Muise H.D., Stanish M.A. Field packing and cooling for fresh produce/ H.D. Muise, M.A.Stanish. – Trends in Food Science Technology, 1996. – P. 7, 175.

11 Sankat C.K., Mujaffar S. Water balance in cut Anthurium flowers in storage and its effects on quality/ C.K. Sankat, S. Mujaffar. – ActaHorticulturae, 1999. – P. 723-732.

12 Sun D.-W., Wang L. Experimental investigation of performance of vacuum cooling for commercial large cooked meat joints / D.-W.Sun, L. Wang. – Journal of Food Engineering 61(4), 2004. – P. 527-532.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ХРАНЕНИИ РАСТИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

О. П. Ломейко, Л. В. Ефименко

Аннотация – в статье проводится теоретическое исследование использования технологии вакуумного охлаждения в процессе переработки сельскохозяйственной продукции. Рассматриваются преимущества, недостатки метода и диапазон возможного использования. Сделан вывод, что дальнейшее исследование технологии с целью внедрения в перерабатывающую промышленность Украины является целесообразным.

THEORETICAL INVESTIGATION OF VACUUM COOLING TECHNOLOGY FOR STORAGE OF PLANT PRODUCTS

O. Lomeyko, L. Efimenko

Summary

The article provides theoretical investigation of vacuum cooling technology for the agricultural processing industry. The advantages and disadvantages of the method and possible range of applications were considered. The conclusion is made that further researching of the technology with the purpose of implementation to Ukraine food processing industry is appropriate.