

КРІОГЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

М. М. Масліков, к. т. н.,
доцент Національного університету харчових технологій

Кріогеніка (від грец. кріо --холод, мороз, лід, генос -- походження) -- наука про одержання та використання низьких температур.

Сьогодні кріогенні технології перестали бути екзотикою, вони використовуються у багатьох галузях народного господарства, зокрема у харчовій промисловості. У цій статті зроблено спробу описати лише деякі з них

XIII конгрес з холоду прийняв рішення вважати кріогенною областю температури, нижчі за 120 К (-153 °С). Причина цього: при атмосферному тиску температури кипіння/конденсації звичайних холодоагентів (фреони, NH₃) лежать вище за цю точку, а точки кипіння/конденсації газів (N₂, O₂ та ін.) -- нижче за неї (табл. 1).

Таблиця 1
Характеристики деяких газів

Назва	Атомна вага	Температура конденсації, T _{конд} , К /°С	Питома теплота пароутворення, г, кДж/кг
Кисень (O ₂)	16*, 17, 18	90,2 /-183,0	212,8
Аргон (Ar)	36, 38, 40	87,3 /-185,9	163,0
Азот (N ₂)	14, 15	77,4 /-195,8	199,3

*Жирним шрифтом виділена атомна вага найпоширенішого ізотопу.

Кріогенна техніка займається розробкою та вдосконаленням низькотемпературних технологій, процесів та обладнання. На відміну від фізики низьких температур вона цікавиться не фундаментальними дослідженнями, а практичним використанням низькотемпературних явищ.

Кріорідини

Якщо поступово охолоджувати газову суміш (наприклад, повітря чи природний газ), то при досягненні відповідної температури конденсації (див. табл. 1) з неї почергово почнуть конденсуватися компоненти. Таким чином можна отримати майже у чистому вигляді компоненти суміші. Такі зріджені гази називають кріорідинами.

У промисловості за допомогою цього методу отримують азот, кисень, аргон (із повітря), виділяють компоненти природного газу (метан та ін.), отримують водень із коксового газу тощо. Кріорідини та чисті гази, отримані з них, широко використовуються у різноманітних кріогенних технологіях як холодоагенти, холодоносії, охолодні середовища.

Кисень, що отримується з повітря, широко використовується у металургії, медицині, будівництві (зварювання) та інших галузях, проте побічним продуктом цього виробництва є холодний газоподібний азот у великій кількості. Подекуди цей азот просто викидається в атмосферу через відсутність споживачів. Будуючи поряд із кисневими заводами підприємства чи цехи зі швидкого заморожування, кріоподрібнення тощо (споживачі зрідженого азоту), можна досягти значного збільшення рентабельності як зазначених підприємств, так і кисневих заводів.

Надшвидке заморожування продуктів

У безмашинних системах швидкого заморожування періодичної та безперервної дії використовуються CO₂ чи зріджений азот. Частіше використовують азот завдяки його інертності, низькій нормальній температурі кипіння та гарним термодинамічним властивостям. Заморожування харчових продуктів рідким азотом нині здійснюється

способами занурення і зрошування.

Спосіб занурення продукту в рідкий азот застосовується в основному для заморожування продуктів, що мають сферичну форму, або для продуктів іншої форми, призначених для подальшого подрібнення: це пояснюється виникненням внутрішнього напруження в продукті, що призводить до утворення тріщин. Негативним моментом занурення є можливість накопичення сконденсованого з повітря кисню у ванні з рідким азотом, що може призвести до самозаймання по мірі випаровування азоту.

З метою зменшення витрати рідкого азоту для заморожування використовують метод зрошування продукту азотом, що виявився економічнішим, ніж занурення. Для цього використовують різного виду форсунки з великим конусом факела, які можуть здійснювати дрібнодисперсне розпилювання рідкого азоту.

В установках періодичної дії порції продукту зрошуються кріорідиною протягом певного часу. Установки безперервної дії виготовляють тунельного або спірально-стрічкового типу. Для ефективнішого використання кріорідини й отримання більш рівномірного температурного поля в продукті потоки продукту та кріорідини рухаються у протитечії. Газ викидають в атмосферу з температурою $-50...0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Був розроблений цілий ряд апаратів такого типу: від невеликих на $50...100\text{ кг}$ апаратів періодичної дії фірми *Messer* до великих ($400...1500\text{ кг/год}$) апаратів безперервної дії (фірма *Linde*), *CRYO-Quick* (фірма *Air Products*), *Union Carbide* (фірма *AGA*) тощо. Такі апарати (рисунок), виконані у вигляді тунелю, до якого конвеєром або у металевих кошиках подається упакований чи неупакований продукт. У першій зоні апарата А продукт охолоджується, контактуючи з газоподібним азотом, що рухається в протитечії. У наступній зоні В він зрошується рідким азотом через форсунки, внаслідок чого поверхня продукту швидко заморожується. На останній стадії у зоні С здійснюється вирівнювання температури продукту з проморожуванням його внутрішніх шарів до температури $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (і нижче). У деяких морозильних апаратах, якщо необхідне повне збереження структури та біохімічного складу, продукт після чи замість зрошування занурюється у ванну з рідким азотом. Під час проходження через рідкий азот продукт швидко проморожується до температур $-150...-195\text{ }^{\circ}\text{C}$. Морозильні апарати цього типу займають площу близько 12 м^2 . Тривалість заморожування в них шматкового матеріалу складає близько 1--5 хв залежно від розміру шматків.

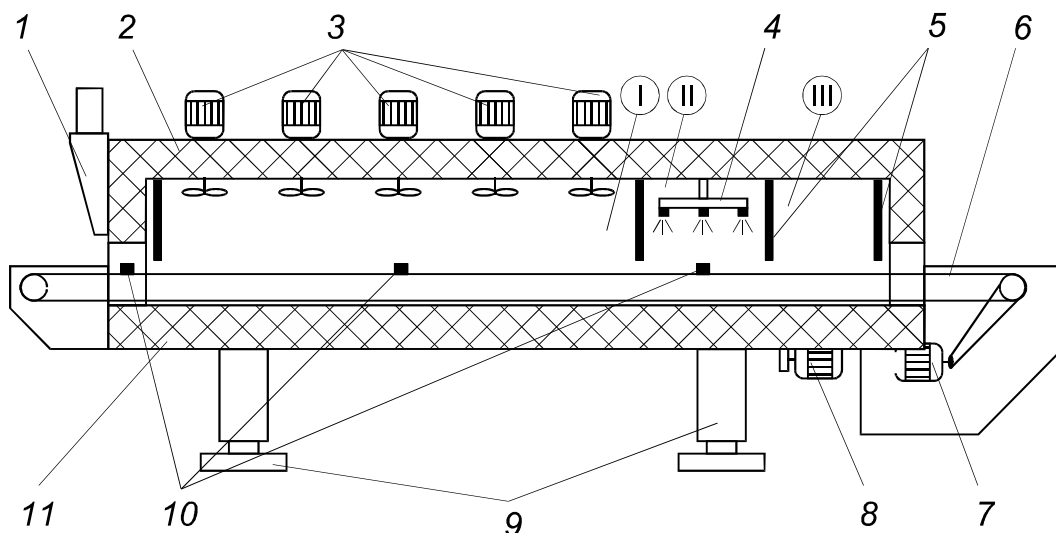


Рис. 3.10. Принципова схема кріогенного швидкоморозильного апарата АСТА
I — зона попереднього охолодження паром азоту; II — зона зрошування зрідженим азотом; III — зона вирівнювання температур; 1 — система відведення відпрацьованого азоту; 2 — теплоізолюваний короб; 3 — циркуляційні вентилятори; 4 — колектор зрідженого азоту з форсунками; 5 — гнучкі холодостійкі шторки; 6 — стрічковий чи сітчастий конвеєр; 7 — привод конвеєра; 8 — привод піднімання теплоізолюваного короба; 9 — опори; 10 — датчі температури; 11 — металева рама з теплоізоляційною плитою).

Такі установки є економічнішими за установки періодичної дії, бо після виходу на режим не потребують додаткових витрат кріорідини на охолодження камери. Продуктивність установки при цьому регулюється шляхом зміни швидкості руху стрічки та витрати кріорідини.

Продукт заморожують до $-18..-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, рідше -- до $-25...-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, інколи -- до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кріогенні установки забезпечують значно вищу швидкість заморожування, ніж традиційні холодильні машини (табл. 2). Завдяки цьому швидко проходить область максимального кристалоутворення ($-1...-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) й утворюється мікрокристалічна структура, що дає змогу уникнути руйнування клітин.

Таблиця 2. Орієнтовна швидкість заморожування для різних способів

Спосіб заморожування	Швидкість заморожування, см/с
Холодильні машини, камери з нерухомим повітрям	0,15
Холодильні машини, камери з примусовою циркуляцією повітря	1,15
Холодильні машини, заморожування у вихоровому потоці повітря	4,80
Зрошення зрідженим азотом	12
Занурення у зріджений азот	120

Заморожування у рідкому азоті порівняно з використанням парокompресійних холодильних машин має ряд переваг:

- нижчі капітальні витрати до 50% (без урахування капітальних витрат на будівництво газороздільної станції);
- відсутність небезпечних та екологічно шкідливих холодоагентів (аміак, фреони);
- висока продуктивність, яку легко можна змінити у 3—5 разів (це забезпечує гнучкість виробництва, особливо потрібну для малих підприємств);
- тривалість процесу у 4—5 разів менша (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ малина заморожується за 20 с, полуниці -- за 40 с);
- втрати неупакованого продукту через усихання значно менші -- близько 1%, тоді як у повітряних швидкозаморозильних апаратах -- 3...6%;
- не руйнується структура клітин, тому відсутнє витікання клітинного соку після розморожування, отже, максимально зберігаються всі поживні речовини та вітаміни. Слід зазначити, що ця перевага може звестися нанівець у разі тривалого зберігання замороженого продукту (особливо якщо температура значно коливатиметься) через процес перекристалізації;
- поверхневі шари продукту під час заморожування насичуються азотом, що додатково вповільнює біохімічні та мікробіологічні процеси у ньому;
- охолодження апаратів триває 20-30 хв (тунельні апарати з парокompресійними машинами охолоджуються протягом кількох годин);
- відсутність потреби у значній кількості електроенергії на місці заморожування (це дає змогу організувати заморожування свіжих продуктів безпосередньо за місцем вирощування фруктів чи вилову риби, максимально зберігши харчову цінність);
- простота конструкції, а отже, підвищена надійність, невелика кількість обслуговуючого персоналу;
- кріогенні морозильні апарати займають у 6--8 разів меншу площу та легко

автоматизуються.

Головним недоліком криогенних швидкоморозильних апаратів є високі видатки на закупівлю кріорідин.

Також підвищена швидкість заморожування може призвести до виникнення внутрішніх напружень у продукті, що призводять до порушення його структури і появи тріщин. Тому доцільно використовувати пару азоту, що утворюється під час заморожування продукту, для попереднього охолодження (зона А на рисунку) та вирівнювання температур за об'ємом продукту (зона С на рисунку).

Для зменшення витрати кріорідини також застосовують комбіноване заморожування. Спочатку продукт обробляють кріорідиною, щоб на поверхні утворилася щільна кірка льоду, яка перешкоджатиме випаровуванню вологи, а потім доморожують у швидкоморозильному тунельному апараті з інтенсивним рухом повітря. Такий спосіб дозволяє отримати заморожений продукт порівняно високої якості з меншими експлуатаційними видатками.

АТЗТ "Рибхолодтехніка" (Санкт-Петербург, Росія) створило дослідний зразок криогенної тунельної установки для заморожування риби, м'яса та інших продуктів в рідкому азоті продуктивністю 300--400 кг/год при витраті рідкого азоту 1,1...1,3 кг/кг сировини, споживаною потужністю до 5 кВт. Забезпечується автоматичне підтримування в тунелі температури -30...-150 °С (з точністю 2...10 °С). Швидкість руху стрічки конвеєра шириною 800 мм плавно регулюється від 0 до 2,1 м/хв.

Фірмою "Континент" (Санкт-Петербург, Росія) розроблено типоряд криогенних швидкоморозильних апаратів продуктивністю 400--800 кг/год. Продукт заморожується до -30...-40 °С. Питома витрата азоту становить 1,3 кг/кг. Заморожування триває 12...15 хв. Стрічковий конвеєр із неіржавіючої сталі шириною 800 мм рухається зі швидкістю 0,2...4 м/хв.

Роботи з удосконалення криогенних морозильних апаратів мають на меті скорочення питомої витрати кріорідини (зокрема, за рахунок збільшення коефіцієнта теплопередачі всередині тунелю).

Значна увага приділяється і автоматизації роботи морозильного апарата. Фірмою *Air Liquid* спеціально розроблена система керування, що дозволяє точно дозувати витрату азоту залежно від типу і швидкості продуктів, які подаються в нього. Якщо тунель навіть на короткий час виявляється порожнім (зокрема, внаслідок збою у системі подачі заморожуваних продуктів), то витрата азоту різко зменшується і забезпечує лише компенсацію зовнішніх теплонадходжень до тунелю.

Розрахунок витрати зрідженого азоту на заморожування

Холодопродуктивність 1 кг азоту складається з кількості теплоти, що відводиться рідким азотом від продукту під час його кипіння, і додаткової кількості теплоти, що утворюється при нагріванні пари азоту до температури, з якою азот виходить із морозильного апарата:

$$q = r + c_n (t_n - t_a), \quad (1)$$

де r -- теплота пароутворення азоту (при парціальному тиску в атмосфері становить 197,6 кДж/кг); c_n -- питома теплоємність пари азоту (1,042 кДж/кг); t_n -- температура пари азоту на виході з апарата, °С; t_a -- температура кипіння рідкого азоту (при атмосферному тиску становить -196 °С).

Проте не вся ця холодопродуктивність витрачається на заморожування продукту. До непродуктивних втрат холоду відносяться постійні втрати на компенсацію теплонадходжень іззовні та на охолодження апарата на початку роботи.

Питому витрату азоту на заморожування продукту (кг/кг) можна оцінити за формулою:

$$M = \frac{h_n^{np} - h_k^{np}}{q\eta_{KMA}}, \quad (2)$$

де $h_n^{пр}$, $h_k^{пр}$ -- питома ентальпія продукту, відповідно, у початковому та замороженому стані; $\eta_{КМА}$ -- коефіцієнт корисної дії швидкокоморозильного апарата.

Коефіцієнт корисної дії азотних швидкокоморозильних апаратів, що використовують спосіб зрошування продукту азотом, становить 0,7...0,85, при цьому разом із втратами у самому апараті враховуються втрати в резервуарі для зберігання рідкого азоту та в магістральних трубопроводах. Його підвищення (шляхом скорочення непродуктивних витрат холоду) сприятиме зменшенню витрати рідкого азоту та здешевленню експлуатації криогенних швидкокоморозильних апаратів.

Криогенні скороморозильні апарати завдяки надзвичайно високій швидкості заморожування дають змогу краще зберегти консистенцію, ароматичні речовини і зовнішній вигляд продукту, скоротити його втрати, а також експлуатаційні та капітальні видатки. У разі використання азоту на існуючих станціях розділення повітря з'являється можливість суттєво підвищивши рентабельність як криогенного заморожування, так і самих станцій.

Перелік використаних джерел

1. Дашков С. А. Что может холод. -- www.sciteclibrary.com.
2. http://www.infrost.ru/refreg_technology/froster/ .
3. Венгер К. П., Касаткин С. В., Антонов А. А. Криогенный аппарат для быстрого замораживания пищевых продуктов // «Холод-консультант», 2004 (www.holod-konsultant.ru).
4. Венгер К. П., Выгодин В. А. Машинная и безмашинная системы хладоснабжения для быстрого замораживания пищевых продуктов.